



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojího inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE ADITIVNĚ VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ

VAVERKA ONDŘEJ, Ing.

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE ADITIVNĚ VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ

TOPOLOGY OPTIMISATION OF ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS

Ing. Ondřej Vaverka

Autor práce
Author

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2020

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	6
2.1	Předběžný cíl disertační práce	8
3	SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	9
3.1	Strukturovaný materiál v topologické optimalizaci	9
3.1.1	Vybrané přístupy a algoritmy	9
3.1.2	Case study a komerční sektor	14
3.2	Studium mikro-prutových struktur	18
3.2.1	Teoretické studium	18
3.2.2	Experimentální studium	19
3.3	Potřebné materiálové vstupy do optimalizace	27
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE	30
4.1	Optimalizační přístupy: vědecké vs. praktické	30
4.2	Používané základní buňky: mikro-prutové vs. ostatní	31
4.3	Studium struktur: teoretické vs. experimentální	33
4.4	Mechanické vlastnosti: aproximované vs. reálné	34
4.5	Závěry analýzy	35
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	36
5.1	Zaměření disertační práce	36
5.2	Cíl disertační práce	36
5.3	Vědecké otázky a pracovní hypotézy	37
5.4	Návrh způsobu řešení	38
5.4.1	Materiál, zařízení a software	39
5.4.2	Postup	40
5.4.3	Plán publikací	43
6	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	44
6.1	Studium chování mikro-prutových struktur	44

6.1.1	Definice mikro-prutových struktur vhodných pro aditivní výrobu	44
6.1.2	Studium chování mikro-prutových struktur při elementárním tlakovém, tahovém a smykovém zatížení	45
6.2	Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu	48
6.2.1	Definice vhodných druhů tepelného zpracování hliníkových slitin.	48
6.2.2	Studium vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.	48
6.2.3	Studium vlivu tepelného zpracování na zbytkové napětí.	49
6.3	Topologická optimalizace a algoritmus návrhu	51
6.3.1	Vypracování a ověření metodiky pro kvalitní návrh objemově topologicky optimalizovaných součástí pro aditivní výrobu.	51
6.3.2	Implementace vyhodnocovacího algoritmu do SIMP metody	51
6.3.3	Návrh skriptu pro přiřazování jednotlivých typů struktur do komponenty	52
6.4	Vzniklé publikace	52
7	ZÁVĚR	54
8	LITERATURA	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	62

1 ÚVOD

Optimalizace tvaru součásti na základě pevnostních výpočtů metodou konečných prvků (MKP) je již od šedesátých let minulého století s výhodou používána hlavně v letectví, kde slouží k bezpečnému snížení hmotnosti komponent. Od začátku je limitována hlavně výrobními technologiemi, kvůli kterým se z mechanického hlediska „optimální“ tvar součásti musí přizpůsobit možnostem produkce. S příchodem topologické optimalizace počátkem devadesátých let se zvětšily možnosti optimalizace, ale technologická omezení zůstala ve své podstatě stejná, takže i když se na přelomu tisíciletí začínají objevovat optimalizační metody, které jdou až do struktury materiálu, je to stále pouze matematická teorie.

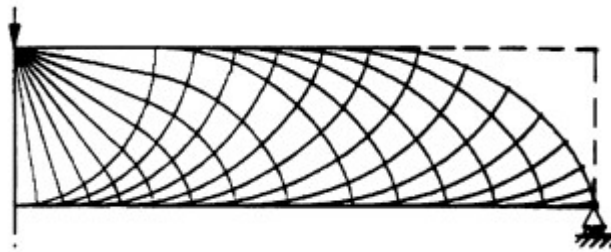
Nové možnosti přináší až rozšíření aditivních technologií, u kterých není potřeba brát ohled na omezení konvenčních způsobů výroby, jako je obrábění nebo odlévání. Složitost optimalizovaného tvaru může být naopak výhodou, protože takovýto díl může mít větší procento samonosných ploch, takže je výroba ve svém důsledku dokonce levnější. S použitím aditivních technologií také vzniklo několik způsobů, jak v rámci jednoho dílu měnit mechanické vlastnosti použitého materiálu ať už je to způsobeno strukturovanou geometrií, různými procesními parametry, nebo dokonce kombinací více materiálů.

Ale ani aditivní technologie nejsou dokonalé a bez omezení. Vyrobitelnost většiny součástí je podmíněna jejich vhodnou orientací na stavěcí platformě, popřípadě použitím podpurných struktur, které se musí použít všude, kde povrch součásti svírá s podložkou úhel menší než kritický, což je zpravidla 45° . Použití podpurných struktur se dá částečně nebo úplně vyhnout, pokud je způsob výroby a orientace dílu na platformě známa a reflektována již při návrhu dílu.

Ačkoliv je v současné době známo velké množství způsobů, jak optimalizovat součásti na úrovni strukturovaného materiálu, jen malé procento splňuje jakékoliv výrobní požadavky i pro aditivní technologie. Proto se v praxi používá pouze omezené množství typů struktur, které dokáží splnit jak nároky topologické optimalizace, tak výrobní technologie. Tato disertační práce se bude zabývat právě studiem chování jednotlivých typů struktur a jejich možnému použití případně kombinaci při návrhu dílu, který bude splňovat požadavky na aditivní výrobu s minimem podpor.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disciplína, která se používá pro návrh dílů na základě matematiky, se nazývá obecně strukturální optimalizace. Je to obor, který se zabývá optimálním rozložením materiálu vůči danému zatížení a podmínkám na něj kladeným. Za první zmínku o návrhu konstrukce pomocí matematické optimalizace je považován článek z roku 1904 s názvem: *The limit of economy of material in frame structures*, který se zabýval vhodným rozložením nosníků v příhradové konstrukci [1]. Podle autora A.G.M. Michella se dodnes jmenuje základní optimalizační úloha, tzv. Michellův nosník (obrázek 2.1).

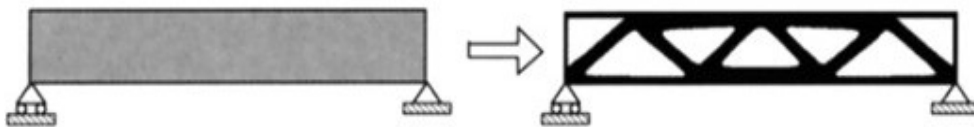


Obr. 2.1: Analytické řešení poloviny Michellova nosníku [2].

Strukturální optimalizace se dá rozdělit do tří stupňů podle toho, co je na začátku dáno a co se mění.

1. Topologická optimalizace (*Topology optimisation*)

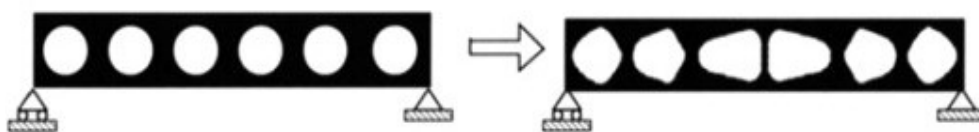
Na začátku je zadán návrhový prostor (Design Space), v kterém může díl vzniknout. Dále jsou zadány okrajové podmínky ve formě zatížení, vazeb a objemových podmínek. V nejčastějším případě je proměnnou hustota materiálu, který se tím buď odebírá, nebo přidává (obrázek 2.2).



Obr. 2.2: Topologická optimalizace [3].

2. Tvarová optimalizace (*Shape optimisation*)

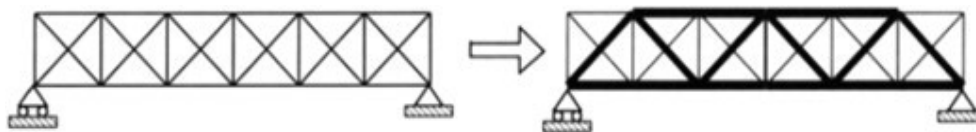
Na začátku je známa topologie dílu a okrajové podmínky. Proměnnou jsou zde souřadnice bodů na hranici topologie, které se mohou v zadaných směrech a intervalech měnit (obrázek 2.3).



Obr. 2.3: Tvarová optimalizace [3].

3. Velikostní optimalizace (*Size optimisation*)

Na začátku je dána topologie, tvar a okrajové podmínky. Mění se parametry geometrie, které ovlivňují velikost jednotlivých entit dílu v daném rozsahu (obrázek 2.4).



Obr. 2.4: Velikostní optimalizace [3].

Za zakladatele topologické optimalizace, jak ji známe dnes (i za prvního, kdo přišel s tímto termínem) lze považovat dánského vědce M. P. Bendsøa. Homogenizační přístup k optimalizaci, který spolu s Noboru Kikuchim v roce 1988 publikoval [4], odstartoval její prudký vývoj. Ve své práci spojil tři do té doby používané metody. Tvarovou optimalizaci, velikostní optimalizaci a homogenizační teorii, která říká, že materiál s jakoukoliv opakující se mikrostrukturou lze považovat za homogenní při správném zvolení jeho hustoty. Principem se stalo hledání optimálního rozložení hustoty, jakožto funkce, která může nabývat hodnot v intervalu 0-1 v hrubě zadaném prostoru.

Obecně matematicky je topologická optimalizace problém hledání minima cílové funkce $F(\mathbf{u}(\rho), \rho)$ (nejčastěji poddajnosti) na prostoru Ω při dodržení zpravidla několika objemových podmínek G_i . Proměnnou minimalizované funkce je hustota $\rho(\mathbf{x})$, u které se pro praxi předpokládá, že může nabývat pouze diskrétních hodnot 0 (prázdný) nebo 1 (materiál). Problém se dá zapsat jako:

$$\min_{\rho} F = F(\mathbf{u}(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(\mathbf{u}(\rho), \rho) dV \quad (2.1)$$

$$G_0(\rho) = \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) dV - V_0 \leq 0 \quad (2.2)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = 0 \vee 1; \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (2.3)$$

kde je předpokladem, že funkce $F(\mathbf{u}(\rho), \rho)$ se dá spočítat jako integrál lokální funkce, (hustoty energie přetvoření u poddajnosti), \mathbf{u} je stavová množina, která je výsledkem lineární nebo nelineární sestavy rovnic (deformace pro poddajnost), V_0 je původní objem a \mathbf{x} je množina souřadnic v prostoru Ω [5].

Tento problém se zpravidla řeší rozdělením domény Ω na konečnoprvkovou síť a poté se dá řešit dvěma přístupy. Buď je proměnnou opravdu hustota a úloha je řešena na pevné síti (většina řešení), nebo je proměnnou hranice tvaru, síť se mění a změna hustoty v jednotlivých místech původního prostoru Ω je pouze vedlejší efekt (více tvarová optimalizace). Takovouto metodou byla například tzv. *Bubble method* navržená Eschenauerem [6], která se dá pokládat za předchůdce metod pracujících s topologickými derivacemi. Ty se dnes ale více používají v kombinaci s metodami používajícími hladinovou množinu, tzv. *Level-set methods*, které jsou již taky na pevné síti [5].

Konkrétní problém, minimalizující poddajnost na prostoru s reálným materiálem, řešený na konečnoprvkové síti se dá maticově zapsat takto:

$$\min_{\mathbf{x}} c(\mathbf{x}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (2.4)$$

$$V(\mathbf{x}) = fV_0 \quad (2.5)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (2.6)$$

kde rovnice 2.4 vyjadřuje problém minimalizace za použití globálních matic posuvů U a tuhosti K , podmínka 2.5 poté nutnou objemovou podmínku jako f násobek původního objemu, kdy f náleží intervalu $(0;1)$. Poslední rovnice 2.6 vyjadřuje podmínku elasticity materiálu čili Hookův zákon. Vektor proměnných x jsou hustoty jednotlivých elementů.

Jak bylo zmíněno, podmínka 2.3 je zavedena hlavně z praktického hlediska, kdy nemá v drtivé většině aplikací smysl uvažovat, že materiál mění svou hustotu v rámci jednoho dílu. V nejpoužívanější optimalizační metodě, navržené Zhou a Rozvanym v roce 1991 [7], Solid Isotropic Material with Penalisation (SIMP) se ale během výpočtu vyskytují hustoty v celém intervalu a musí být dodatečně penalizovány, aby dávaly fyzikální smysl.

Díky aditivním technologiím ale vznikla možnost, jak prakticky interpretovat element s proměnnou hustotou díky mikro-prutovým strukturám. Ty jsou ve většině případů reprezentovány strukturou odvozenou od tělesových úhlopříček krychle tzv. Body centered cubic neboli BCC mřížky. Matematicky je to hlavně ze dvou důvodů. BCC buňka je relativně izotropní tzn. má stejné vlastnosti ve všech třech základních směrech (samozřejmě v makro měřítku). Navíc dobře vystihuje mechanické vlastnosti, které jsou ve výpočtech aproximovány pomocí vztahu zahrnujícího hustotu a mocninný koeficient odvozený od poissonova čísla.

Z technologického hlediska má BCC mřížka zásadní výhodu ve formě samonosnosti, tzn. je vyrobitelná bez podpurných struktur i pomocí aditivních technologií pracujících s kovem. Ty jsou totiž více náchylné k potřebě podpurných struktur než plastové aditivní technologie. Proto je BCC mřížka použita v drtivé většině kovových prototypů navržených s pomocí mikro-prutových struktur.

BCC mřížka ovšem není jediná, která je dobře aditivně vyrobitelná. Přesto je použití jiných typů mikro-prutových struktur velice omezeno a zaslouží si podrobné prozkoumání.

2.1 Předběžný cíl disertační práce

Aditivní výroba obecně a konkrétně výroba a studium mikro-prutových struktur zažívá v poslední době obrovský rozmach. Mnoho studií se věnuje jak experimentálnímu, tak teoretickému studiu mikro-prutových struktur. Většina je omezena na jeden typ buňky, s kterou je posléze vyroben základní technologický demonstrátor. Pokud je použito více druhů, tak chybí praktický dopad nebo návrh aplikace. Disertační práce by se měla zaměřit na propojení těchto dvou oblastí a rozšířit možnosti navrhování praktických součástí s více druhy mikro-prutových struktur.

3 SHRNUÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Disertační práce spojuje dohromady tři oblasti: topologickou optimalizaci, strukturované materiály a aditivní technologie. Proto i shrnutí současného stavu poznání je rozděleno na tři hlavní části. Základem práce je propojení topologické optimalizace a mikro-prutových struktur. První část se soustředí na využití strukturovaného materiálu při topologické optimalizaci. Druhá se zabývá nejprve teoretickým studiem mikro-prutových struktur a poté jsou zde uvedeny články, které se zabývají experimentálním studiem aditivně vyrobených mikro-prutových struktur.

Nedílnou součástí bezpečného snížení hmotnosti je určení dosažitelných materiálových vlastností použitého materiálu. Proto je zde zahrnuta část věnovaná aditivně vyráběným hliníkovým slitinám. Je omezena na tepelné zpracování, které je nedílnou součástí používaného post-procesingu a má velký vliv na mechanické vlastnosti.

3.1 Strukturovaný materiál v topologické optimalizaci

V této podkapitole jsou obsaženy dva hlavní směry, V prvním jsou teoretické návrhy algoritmů a přístupů k využití strukturovaného materiálu při optimalizaci. Ve druhém jsou zmíněny nejzajímavější praktické výstupy a případové studie zhotovené ve většině případů odbornými firmami, ale bez vědecké publikace.

3.1.1 Vybrané přístupy a algoritmy

Rodrigues, et al., 2002 – *Hierarchical optimization of material and structure* [8]

Coelho, et al., 2008 – *A hierarchical model for concurrent material and topology optimisation of three dimensional structures* [9]

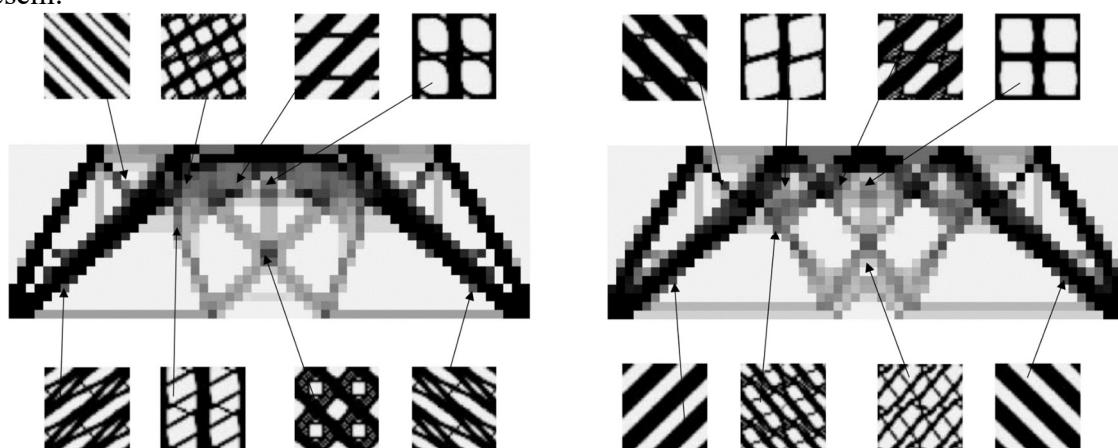
Autorský tým z univerzity v Lisabonu se spolu s dalšími kolegy poprvé vydal opačným směrem při řešení problému homogenizační [4] a posléze SIMP metody [7]. Místo aby se snažili eliminovat přechodné hustoty (tzv. šedé elementy) a dostali čisté černo bílé řešení, rozhodli se je využít. Rozdělili optimalizační problém na dvě úrovně, které jsou hierarchicky řešeny. V první úrovni se optimalizoval makro tvar součásti a byly získány hodnoty hustot pro jednotlivé elementy. V druhé úrovni se za použití penalizačního přístupu SIMP počítalo rozložení materiálu v jednotlivých elementech konečnoprvkové sítě. Dle výsledku se pak zpětně aktualizovaly globální hustoty a vlastnosti (poddajnost, energie přetvoření, napětí).

Předpokladem bylo, že se mikrostruktura materiálu zlehka mění mezi elementy. V praxi ale mohlo dojít k tomu, že každý element měl vlastní materiálovou distribuci. Navíc takovéto řešení, kdy je každý element rozdělen na další zvlášť řešené konečnoprvkové sítě velmi výpočetně náročné.

Výsledky

Autoři demonstrovali navržený algoritmus ve 2D na Michelově nosníku a nosníku zatíženém na horní ploše několika osamocenými silami ve 2D i 3D. Ve 3D navíc i na vetknutém prutu namáhaném kombinovaným ohybem a krutem. Na obrázku 3.1 jsou ukázána dvě řešení lišící

se ve formulaci algoritmu dle napětí nebo přetvoření (obrázek 3.1). Obě řešení jsou následně porovnána s řešením algoritmu SIMP a obě vykazují nižší hodnotu poddajnosti, tudíž lepší řešení.



Obr. 3.1: Optimální řešení nosníku navržené hierarchickým přístupem formulovaným pomocí přetvoření (vlevo) a napětí (vpravo) [8].

Závěry

Průkopnická práce, která poprvé využila přechodné hustoty k optimalizaci struktury materiálu. Její výpočet je ale i při možné paralelizaci velice náročný z důvodu definice konečnoprvkové sítě, kdy každý element obsahuje další síť subelementů.

Práce ovšem ukazuje, že pro každé místo v součásti je optimální jiná mikrostruktura a že návrh s použitím strukturovaného materiálu je tužší než při použití materiálu plného. Mikrostruktura je ovšem prakticky nevyrobitelná a může dojít k jejím nespojitostem na hranicích elementů.

Liu, et al., 2008 – *Optimum structure with homogenous optimum truss-like material* [10]

Yan, et al., 2014 – *Concurrent topology optimization of structures and their composite microstructures* [11]

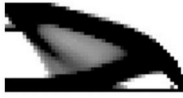
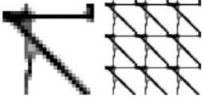






Autory navržená metoda se výrazně vyhrazuje vůči výše zmíněnému hierarchickému přístupu, kterému vytýkají jeho praktickou nevyrobitelnost. Aby předešli tomuto problému, navrhují mikrostrukturu, která je v celé součásti uniformní. Nehledají tedy černo-bílé řešení ani různě šedé řešení, jak je tomu u hierarchického přístupu, ale šedo-bílé, kdy je jediným použitým materiálem, materiál strukturovaný s jednotnou relativní hustotou.

Z výpočetního hlediska jde o souběžnou optimalizaci v makro a mikro měřítku. Liu et al. používá na úrovni elementů SIMP metodu k dosažení „čistého“ řešení. Na makro úrovni je použita obdobná metoda, kterou ale autoři nazývají PAMP (Porous Anisotropic Material with Penalization), aby zdůraznili fakt, že materiál je výsledkem homogenizace jednotlivých buněk, které nejsou ani plné ani izotropní.

Na druhou stranu Yan et al. použili jako optimalizační metodu na mikro i makro úrovni BESO (Bi-directional Evolutionary Structural optimization). Předpokládá, že součást je tvořena jedním kompozitním materiálem.

Výsledky

V této části autoři diskutují vliv volby jednotlivých parametrů, kterými jsou hlavně zvolená relativní hustota materiálu (objemový podíl v mikro měřítku) (viz obr. 3.2) a zvolený objemový podíl v makro měřítku. Demonstrace probíhá opět na Michellově nosníku a na nosníku ve tvaru L v případě Lia a na vetknutém nosníku v případě Yana. Autoři porovnávají výsledky pouze mezi sebou v rámci různých voleb parametrů.

1	$\bar{\rho}^M$	Compliance	Structural topology	Microstructural topology
0.12	0.2	8880		
0.12	0.3	6210		
0.12	0.4	5676		
0.12	0.5	5487		

Obr. 3.2: Tabulka ukazující výsledky při konstantním objemovém podílu a měnící se relativní hustotě struktury [10].

Závěry

Další pokus o souběžnou optimalizaci v makro a mikro měřítku, který je zaměřen na lepší výrobitelnost. Ani uniformní struktura ovšem nezaručuje výrobitelnost součásti. Autoři navíc vůbec neuvažují použití plných elementů.

V těchto studiích došlo k výraznému snížení výpočtové náročnosti, neboť existují pouze dvě konečnoprvkové sítě. Jedna pro celou součást a druhá pro jeden element, který je použit všude, kde má být materiál.

Díky uniformitě materiálu je tato metoda jednoduše využitelná pro další problémy, jako je optimalizace vlastních frekvencí [12], vedení tepla [13] nebo nejistot při zatížení [14].

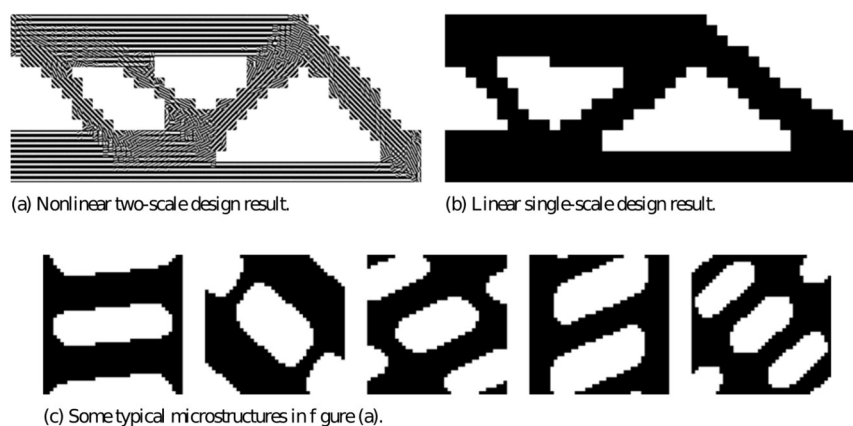
Xia a Breitkopf, 2014 – Concurrent topology optimization design of material and structure within FE^2 nonlinear multiscale analysis framework [15]

Autoři navazují na předchozí práce [8, 9]. Pro souběžný návrh materiálu i celkové topologie je zde použita tzv. FE^2 metoda. Ta je založena na dvou úrovnovém MKP řešení, kdy nedochází k homogenizaci. Makroskopické vlastnosti jsou odvozeny přímo na základě napěťově deformačních vztahů mikrostruktury. Algoritmus nejprve vyhodnotí přetvoření v makro měřítku. Poté v jednotlivých elementech pomocí rozdělení na subelementy spočítá rozložení napětí a přetvoření a jejich zprůměrováním dostane makro hodnotu v daném elementu.

Stejný dvouúrovňový princip je použit i pro topologickou optimalizaci, kdy je prakticky optimalizován nelineární materiál, který je následně použit pro klasickou deformační analýzu. Zajímavé na této práci je i to, že jako optimalizační metoda je zde použita diskrétní heuristická metoda BESO.

Výsledky

Pro ověření je zde metoda aplikována na jednoduchý trémový nosník a na Michellův nosník (viz obrázek 3.3). Publikované topologie jsou porovnávány s jednoúrovňovými lineárními výsledky. Výsledná poddajnost je nižší než u předešlých zde zmíněných dvou algoritmů.



Obr. 3.3: Michellův nosník optimalizovaný metodou FE2 s využitím BESO (vlevo). Jednoúrovňový lineární design (vpravo). [15]

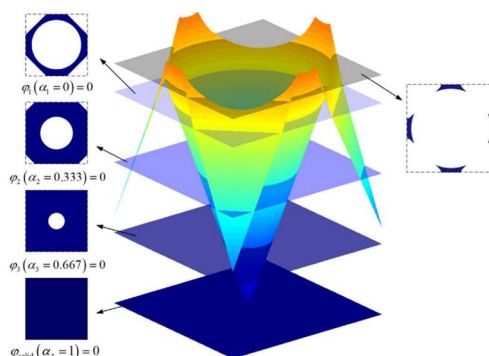
Závěry

Metoda dává dobré výsledky. Je robustní a díky využití jednoduchých vztahů bez homogenizace ji lze adaptovat na různé nelinearity. Nedostatkem zůstává vysoká výpočetní náročnost, kdy stejně jako u Rodrigueze [8] se počítá každý element zvlášť.

Sivapuram, et al., 2016 – *Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization* [16]

Wang, et al., 2017 – *Concurrent design with connectable graded microstructures* [17]

Ačkoliv tyto dva kolektivy autorů nic nespojuje, jsou zde dohromady kvůli použití stejné optimalizační metody založené na principu Level-set optimalizace. Tento druh optimalizace je typický svou definicí, kdy Level-set funkce udává hranici optimalizované oblasti (obrázek 3.4) a vyvíjí se díky evoluci Hamilton-Jacobiho funkce, která popisuje hranici oblasti v zobecněném variačním principu.



Obr. 3.4: Princip Level-set metody ukázaný na generaci knihovny struktur u Wanga et al. [17]

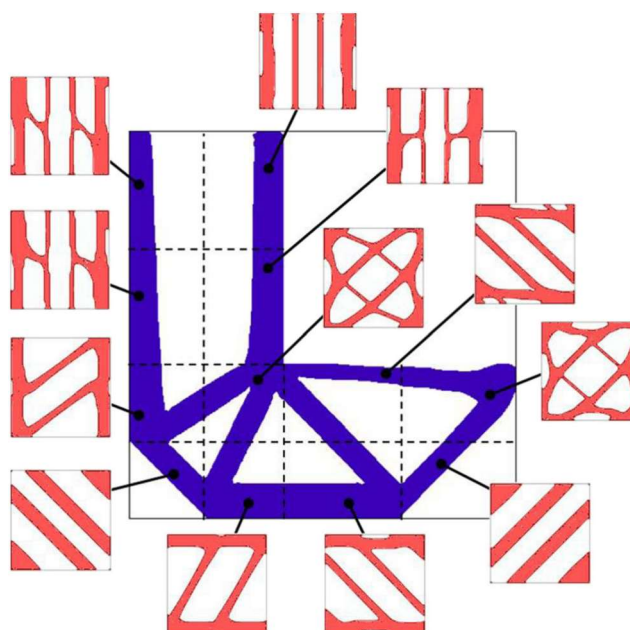
Sivapuram et al. se zaměřili hlavně na možnost efektivní paralelizace pro nezávislý výpočet makro topologie a mikrostruktury. Pro propojení obou úrovní je opět využita homogenizace. Metoda je navržena tak, aby se dala uzpůsobit výpočetním požadavkům. Může existovat buď ve variantě unikátních elementů, nebo uniformní struktury.

Wang se na druhou stranu soustředí na vyrobitelnost a fakt, že mikrostruktura v jednotlivých elementech na sebe u jiných algoritmů nemusí bezpodmínečně navazovat hlavně ve spojení s gradientní strukturou. Principem navrženého postupu je prvotní návrh knihovny gradientních elementů, které se poté použijí pro optimalizaci a vždy na sebe navazují, protože mají totožné geometrie na okrajích prvků.

Výsledky

Sivapuram používá pro verifikaci přístupu nosníky zmíněné v literatuře (Michellův a L-nosník – obrázek 3.5) a také poddajný mechanismus. Výsledky porovnává pro různé volby parametrů hlavně počet mikrostruktur (jedna nebo více).

Wang používá vetknutý kompozitní nosník a Michellův nosník, který porovnává s řešením pomocí SIMP a s použitím homogenní struktury.



Obr. 3.5: Řešení L-nosníku s 12 mikrostrukturami a 40 % použitého materiálu [16].

Závěry

Použití Level-set metody nabízí jiný přístup k tvorbě strukturovaného materiálu. Obě metody jsou velice flexibilní a dokážou definovat počet různých druhů elementů. Nejsou tedy omezeny na jeden nebo na bezpodmínečnou optimalizaci ve všech bodech součásti.

3.1.2 Case study a komerční sektor

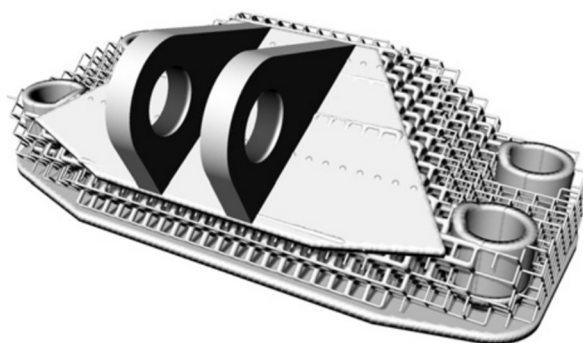
Tang, et al., 2015 – *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing* [18]

V roce 2013 byla spuštěna internetová soutěž, ve které bylo nutné navrhnout co možná nejlehčí variantu držáku na proudovém motoru. Byly zadány okrajové podmínky, materiál, obálka dílu a napěťové kritérium. Vítězný design dokázal při splnění všech podmínek snížit hmotnost plně objemového dílu o 84 %.

Autoři článku si vybrali tento díl pro demonstraci metodiky, která navrhuje díly hybridním způsobem, tj. za použití objemových částí a mikro-prutové struktury. Navržený algoritmus nejprve rozdělí díly na plochy a objemy a ty posléze na funkční a nefunkční, popřípadě určené k nahrazení mikro-prutovou strukturou. Mikro prutová struktura je důmyslně vygenerována uvnitř optimalizovaného objemu a spojena s plnými částmi. Posledním krokem je aplikace BESO algoritmu na optimalizaci tloušťek prutů.

Výsledky

Byly zkoumány dva přístupy. Jeden s homogenní mikro-prutovou strukturou a jeden s optimalizovanou strukturou. Heterogenní struktura vyšla dle očekávání lépe. Výsledný díl (obrázek 3.6) snížil hmotnost o 75 %, což by nestačilo ani první desítku v soutěži.



Obr. 3.6: Optimalizovaný držák do proudového motoru [18].

Závěry

Metoda se věnuje převážně návrhu mikro-prutové struktury do jakéhokoliv objemu. Struktura je opět vyrobitelná pouze plastovými technologiemi, i když materiálem by měla být titanová slitina Ti6Al4V. I když není design lehčí než vítězové soutěže, nikde není porovnání deformací. Zde navržený design může mít velký potenciál v celkové tuhosti. Další optimalizace držáku lze nalézt v článcích [19, 20] a oficiální vyhodnocení pořadatelů v [21].

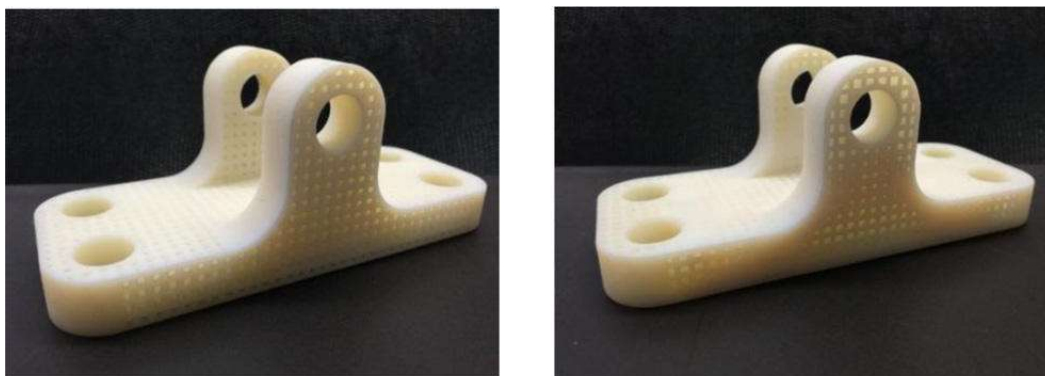
Cheng, et al., 2017 – *Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation* [22]

Navržená metoda pro optimalizaci pomocí strukturovaného materiálu vychází z homogenizace vybraného typu buňky. U něj jsou zjištěny reálné mechanické vlastnosti po celém uvažovaném rozsahu relativních hustot. Ty jsou poté použity pro topologickou

optimalizaci. Její algoritmus je velice podobný klasickému algoritmu SIMP, akorát je v něm nahrazena materiálová interpolace reálnými hodnotami z homogenizace.

Výsledky

Autoři testují navrženou metodu na nosníku pro tří bodový ohyb. Porovnávají zde tuhost uniformní struktury a optimalizované. Ta je tužší o 156 %. Stejně srovnání je poté provedeno na průmyslovém držáku (obrázek 3.7). Všechny prototypy jsou vyrobeny FDM technologií.






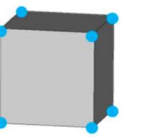







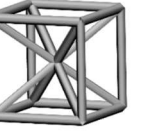
Obr. 3.7: Uniformní struktura na držáku vlevo a optimalizovaná na držáku vpravo [22].

Závěry

Studie ukazuje výhody optimalizovaných struktur oproti uniformním. Navržená základní buňka opět není ideální pro kovové aditivní technologie.

Chen, et al., 2018 – *Finite-Element-Mesh based method for modeling and optimization of lattice structures for additive manufacturing* [23]

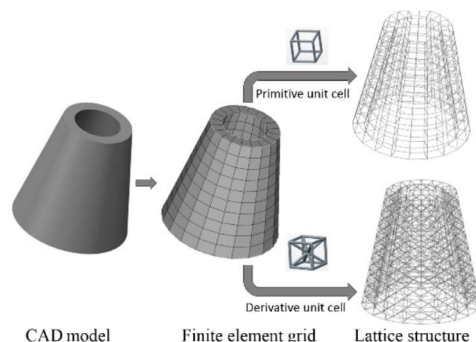
Autoři navrhuje postup, který vytvoří mikro-prutovou strukturu na základě konečnoprvkové sítě. Na součásti je nejprve vytvořena síť jako pro jakoukoliv jinou analýzu založenou na MKP. Jednotlivé elementy jsou posléze identifikovány a nahrazeny buď jednoduchou mikro-prutovou buňkou kopírující hrany elementu, nebo jsou doplněny o tělesové úhlopříčky (viz obrázek 3.8). Výsledná struktura je posléze upravována pomocí BESO algoritmu.

Element Type	Triangle	Quadrangle	Tetrahedron	Hexahedron
Element and nodes				
Primitive cell				
Derivative cell				

Obr. 3.8: Nahrazování elementů konečnoprvkové sítě mikro-prutovými strukturami [23].

Výsledky

Navrženým postupem byla připravena konická součást zatížená tlakem (obrázek 3.9). Jsou vyrobeny dvě varianty s vyztuženými mikro-prutovými strukturami, které se liší v aplikaci dodatečné optimalizace prutů algoritmem BESO. Vyrobeny jsou pomocí technologie SLA. Provedenou tlakovou zkouškou je ukázáno, že tuhost celé součásti se díky optimalizaci prutů zvedla o 12 %.



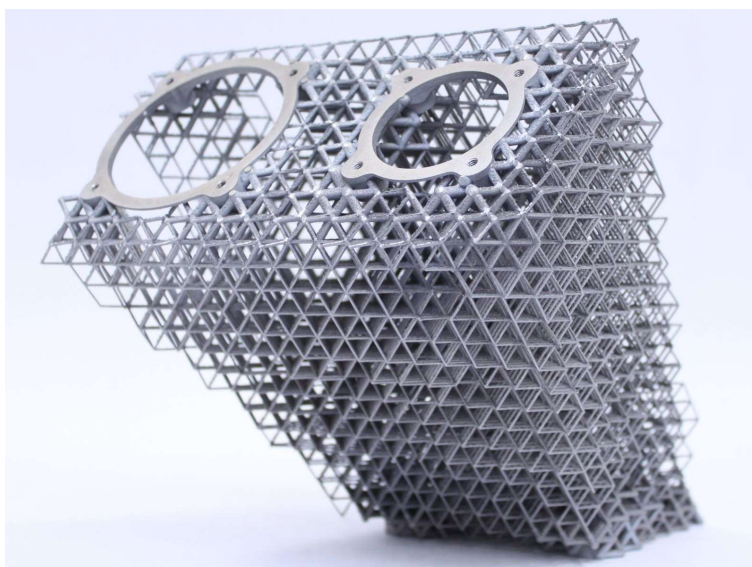
Obr. 3.9: Součást nahrazená jednoduchou (vlevo) a vyztuženou (vpravo) mikro-prutovou strukturou [23].

Závěry

Prakticky využitelný postup pro převedení jakékoliv geometrie na mikro-prutovou strukturu. Aditivní výroba je omezena pouze na plastové technologie, protože obsahuje velké množství prutů, které by byly rovnoběžné se stavěcí platformou.

LK Engineering – Konzola satelitní antény [24]

Brněnská společnost LK Engineering ve spolupráci s naším ústavem v minulých letech navrhla dvě varianty konzoly pro satelitní anténu (obrázek 3.10). Metodika návrhu spočívá v optimalizaci poskytnuté domény a nahrazení jednotlivých hustot příslušnou mikro-prutovou strukturou. Jedinečnost algoritmu spočívá v použití korekčních součinitelů, které korelují simulaci a reálně vyrobený materiál.



Obr. 3.10: První generace konzoly satelitní antény navržené firmou LK Engineering [24].

Altair Engineering – Optistruct a Inspire [25]

Americká společnost Altair Engineering je v současné době asi největším producentem softwarů na topologickou optimalizaci s desítkami let praxe. Výpočetní jádro Optistruct v poslední době nabízí topologicky optimalizovaný tvar odlehčit mikro-prutovou strukturou, která se dá navíc optimalizovat z hlediska použitých tloušťek (obrázek 3.11).



Obr. 3.11: Držák na skleněné desce optimalizovaný společností Altair [25].

nTopology [26]

Relativně mladá americká firma, která vyvíjí softwary pro strukturální návrhy se zaměřením na aditivní výrobu (obrázek 3.12).



Obr. 3.12: Pedál do závodního vozu optimalizovaný společností nTopology [26].

3.2 Studium mikro-prutových struktur

Analytické vztahy popisující chování materiálů složených z periodicky se opakující buňkové struktury byly formulovány Lornou Gibson a Michaellem F. Ashbym. Ačkoliv byly původně navrženy pro pěny, ukazuje se, že je lze aplikovat i na mikro-prutové struktury, a proto jsou zde zmíněny. Na ně navazují studie zabývající se mechanickým zkoumáním aditivně vyrobených mikro-prutových struktur.

3.2.1 Teoretické studium

Ashby, 2006 – *The properties of foams and lattices* [27]

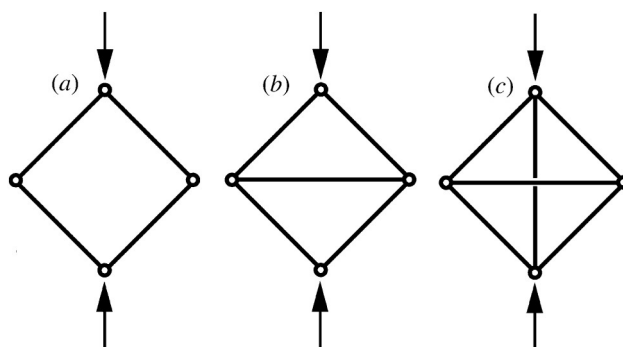
Tato práce je sumarizační článek, která popisuje výzkum a publikace autora za období více jak deseti let. V této době vyšla řada článků a knih ve spolupráci s Lornou Gibson nebo Vikramem Deshpandem [28, 29] a dala vzniknout analytické teorii strukturovaných materiálů, která se používá dodnes.

Hlavní myšlenkou je fakt, že pro popis makro chování strukturovaného materiálu stačí znát tři věci:

1. Základový materiál, z kterého je struktura vytvořena.
2. Topologii a tvar základové buňky.
3. Relativní hustotu strukturovaného materiálu.

Na základě těchto znalostí lze dostatečně přesně předpovědět chování. Pozdější studie dokazují, že tyto zákonitosti fungují i pro mikro-prutové nebo jinak strukturované materiály vyrobené aditivně.

Z pohledu statiky lze použít jednoduché základní dělení, které využívá maxwellovy podmínky stability. Pokud vezmeme buňku materiálu na obrázku 3.13a, tak pokud budou styčníky bez tření, tak po aplikaci síly vznikne mechanismus. Pokud budou styčníky fixované, tak bude zatížení způsobovat ohybový moment. Takováto struktura se nazývá ohybově dominantní. Pokud vezmeme strukturu na obrázku 3.13b, tak zde i při volných styčnicích bude struktura tuhá, a navíc bude střední prut namáhán na tah, což bude hlavní zatížení. Takovéto struktury se nazývají tahově dominantní a typicky jsou to trojúhelníkové struktury.

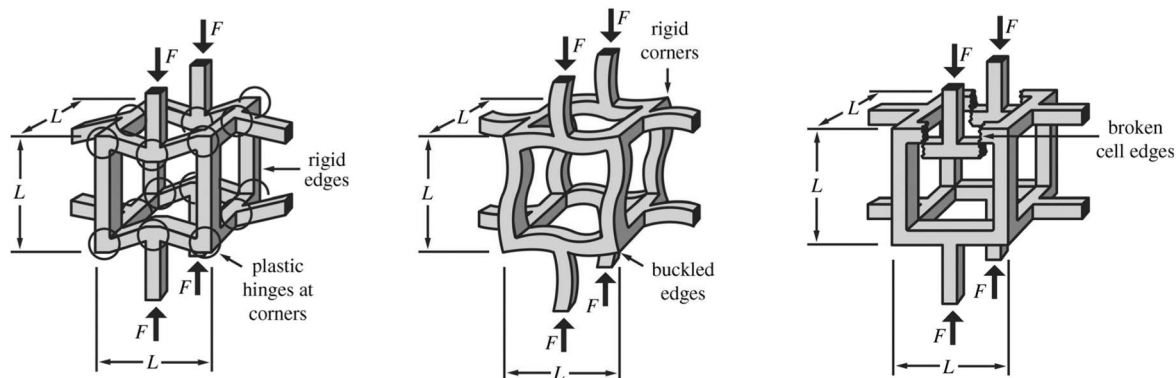


Obř. 3.13: a) ohybově dominantní struktura, b) tahově dominantní struktura c) staticky přeřurčená struktura [27].

Tahově namáhané struktury se potýkají s implicitní vnitřní napjatostí, protože jsou ve většině případů staticky přeřurčené. Pro strukturální aplikace (na rozdíl od absorberů energie)

jsou ale daleko výhodnější, protože mají vyšší modul pružnosti než ohybově dominantní struktury při stejné relativní hustotě.

Při zatížení strukturovaných materiálů mohou nastat tři různé mechanismy poruchy. Nastane ten, který je energeticky méně náročný. Buď dojde k ohybu jednotlivých prutů (tažné materiály, obrázek 3.14a), nebo ke ztrátě jejich vzpěrné stability (elastické materiály, obrázek 3.14b), nebo k lomu (křehké materiály, obrázek 3.14c).



Obr. 3.14: Dominantní ohyb u plastického materiálu (vlevo), ztráta vzpěrné stability (uprostřed) a lom (vpravo) [27].

Pro mechaniku porušení není důležité, jestli je buňka uzavřená nebo otevřená. U uzavřených buněk jsou stěny tak tenké, že nepřenášejí žádné mechanické zatížení a většina jde přes hrany buňky.

Závěry

Důležitým poznatkem jsou vztahy pro relativní modul pružnosti, který je u ohybově dominantních struktur kvadraticky závislý na relativní hustotě a u tahově namáhaných struktur je závislost přibližně lineární.

3.2.2 Experimentální studium

Smith, et al., 2013 – *Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique* [30]

Práce se zaměřuje na srovnání dvou přístupů k MKP výpočtu mikro-prutových struktur s experimentálními daty. Zkoumána je absorpce energie a kolaps struktury při tlakovém zatížení. Zkoumány jsou buňky BCC a BCCZ při různých relativních hustotách. (0,04 – 0,14). Zkoumán je také vliv topologie buňky z hlediska poměru šířky ku výšce.

Struktury jsou modelovány objemovými prvky nebo pomocí prutových prvků. Studována je vždy jedna buňka. Experimenty byly provedeny na vzorcích vyrobených pomocí SLM o rozměrech 20x20x20 mm s 8 buňkami v řadě z materiálu 316L.

Výsledky

Byl pozorován rozdílný mechanismus při deformaci obou typů buněk. BCC má progresivní a stálý kolaps, zatímco u BCCZ dochází k postupnému ztrácení vzpěrné stability vertikálních prutů. Pozorována byla také deformace v pásech pod 45 °. Celkově byla pozorována velice dobrá shoda obou výpočtů a experimentálních dat.

Byla pozorována zlepšená absorpce energie, tuhost a mez kluzu u struktur, které nebyly krychlové, ale byly prodlouženy ve vertikálním směru.

Závěry

Struktury lze modelovat jak prutově, tak objemově a v obou případech mají dobrou shodu s experimentem. Snížení úhlu mezi pruty a podložkou způsobuje jejich lepší mechanické vlastnosti při tlakovém zatížení. Experimenty potvrdily lepší vlastnosti, než předpověděla simulace díky lepší kvalitě vyrobených prutů.

Aremu, et al., 2014 – A comparative finite element study of cubic unit cells for selective laser melting [31]

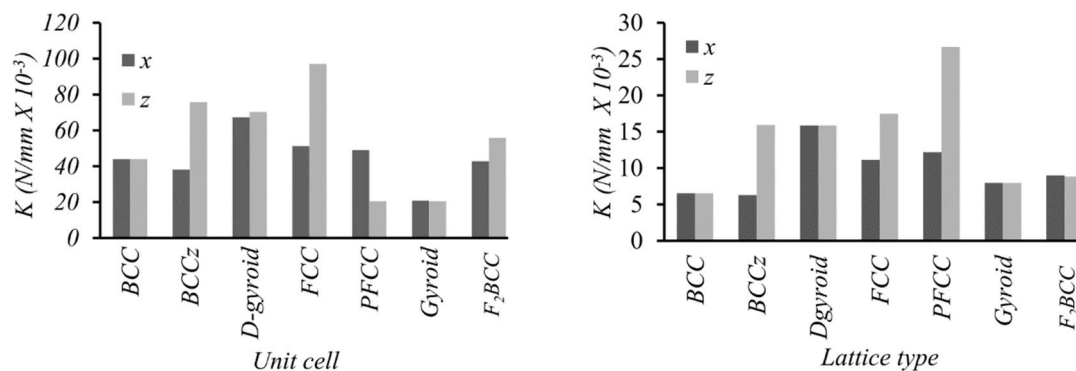
Autoři se zabývají výpočtovým srovnáním 7 druhů struktur pomocí MKP. Struktury mají jednotnou velikost o straně krychle 10 mm a relativní hustotu 0,23. Zkoumána je buňka BCC, BCCZ, FCC, PFCC (FCC s pruty v Z), F₂BCC (kombinace FCC a BCC), gyroidní a D-gyroidní (double gyroid).

Samotná analýza probíhala na geometriích charakterizovaných voxely. Struktury byly zatěžovány přes přidanou horní desku tloušťky 1 mm. Testovány byly jak jednotlivé buňky, tak strukturované kostky se 4 buňkami na hranu.

Výsledky

Autoři pozorují největší deformace v tlaku u gyroidní buňky spolu s BCC buňkou. U buněk FCC, PFCC, a BCCZ je pozorovaná rozdílná deformace v ose z a x. Chování jednotlivých buněk je docela dobře reflektováno i v chování celé struktury (obrázek 3.15).

Maximální napětí se objevuje u gyroidní buňky. U celých struktur výrazně roste napětí i u BCC.



Obr. 3.15: Porovnání tuhosti jednotlivých buněk a celých struktur [31].

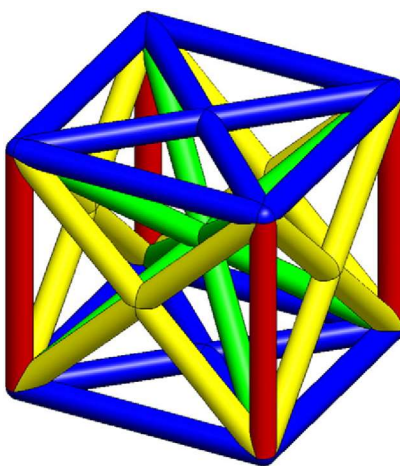
Závěry

Autoři shrnují výzkum zjištěním, že FCC, PFCC a D-gyroidní buňky jsou vhodné pro tlakově namáhané aplikace. D-gyroid má navíc největší povrch, proto je vhodný i pro aplikace, kde je požadován přenos tepla.

Leary, at al., 2016 – Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures
[32]

Autoři se zabývají vyrobiteľností mikro-prutových struktur a následně jejich experimentálním testováním. Identifikovali možné orientace prutů ve struktuře (obrázek 3.16) a experimentálně ověřili jejich vyrobiteľnost. Na jejich základě navrhli 5 druhů mikro-prutových struktur, které byly vyrobeny. Byly to BCC, BCCZ, FCC, FCCZ a BFCCZ. Všechny vzorky byly vyrobeny jako krychle o straně 75 mm s deseti buňkami v řadě o průměru prutu 1 mm. Struktury tak měly různou relativní hustotu od 0,09 do 0,21. Materiálem byla hliníková slitina AlSi12Mg.

Struktury byly podrobeny tlakovým zkouškám a byla sledována jejich deformace. Před zničením byly struktury digitalizovány pomocí μ CT a geometrie byly podrobeny MKP analýze pro porovnání s experimentálními daty. Také byla zkoumána drsnost povrchu na spodních, bočních a horních plochách.



Obr. 3.16: Identifikace jednotlivých úhlů, které svírají pruty s podložkou. Modré jsou nevyrobiteľné [32].

Výsledky

Bylo zjištěno, že horizontální pruty nelze vyrobit. Dále autoři ukazují, že drsnost povrchu je největší na spodní straně prutů a největší je na prutech, které jsou nejvíce skloněny. Na horní a boční straně prutů se neprojevuje vliv úhlu.

Testování ukázalo pásovou deformaci pro BCCZ, FCC a FCCZ strukturu. Struktury, které měly pruty ve směru zatížení, měly větší tuhost.

MKP analýza ukázala, že vlivem výroby je výsledná struktura tužší, než předpokládá simulace. Autoři to připisují lokálním plastickým deformacím, které se objevují typicky u pěnových materiálů.

Závěry

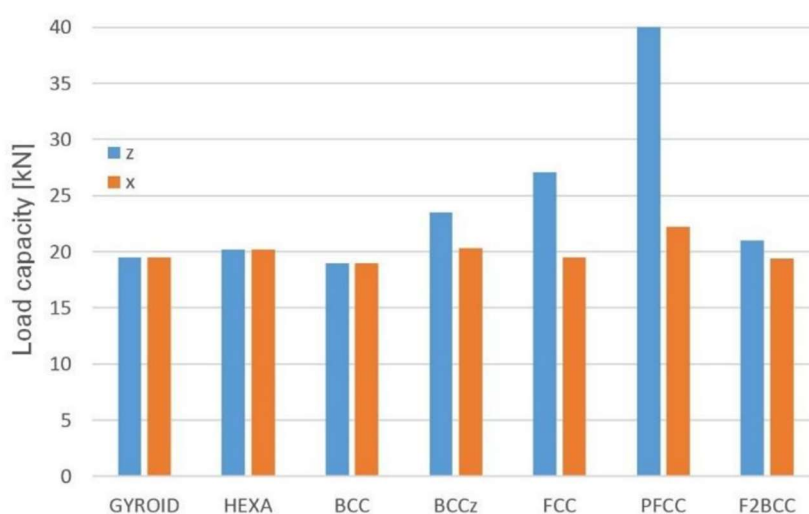
Porovnání reálně vyrobiteľných struktur podložené analýzou vyrobiteľnosti prutů. Porovnání jednotlivých struktur není vypovídající, protože se liší jejich relativní hustota. Důležité zjištění, že mikro-prutové struktury se nechovají pouze jako pevný materiál, ale jsou zde i jevy tradičně spojované s kovovými pěny.

Hanzl et al., 2017 – A comparison of lattice structures in metal additive manufacturing [33]

Tým autorů ze Západočeské univerzity v Plzni se zabýval studiem chování struktur při tlakovém zatížení v ose z a x. Použil při tom vzorky s velikostí buňky 5 mm a shodnou relativní hustotou 0,135. Struktury měly po pěti buňkách v řadě. Zkoušené typy byly BCC, BCCZ, FCC, PFCC (FCCZ), F₂BCC, gyroidní a hexagonální buňky. Všechny vzorky byly opatřeny deskou, přes kterou byly struktury zatěžovány. Materiálem byla maraging ocel MS1.

Výsledky

Autoři prezentují jednoduché výsledky, které ukazují rozdílnou tuhost struktur vlivem topologie i směru zatížení (obrázek 3.17). Je tak prezentována velká anizotropie. Největší tuhost v obou směrech i největší anizotropii dosahuje buňka PFCC, zatímco BCC buňka, gyroidní buňka a hexagonální buňka vykazují stejné chování v obou směrech ale zároveň i nejnižší tuhosti.



Obr. 3.17: Porovnání vybraných druhů strukturovaných materiálů namáhaných v ose z a x [33].

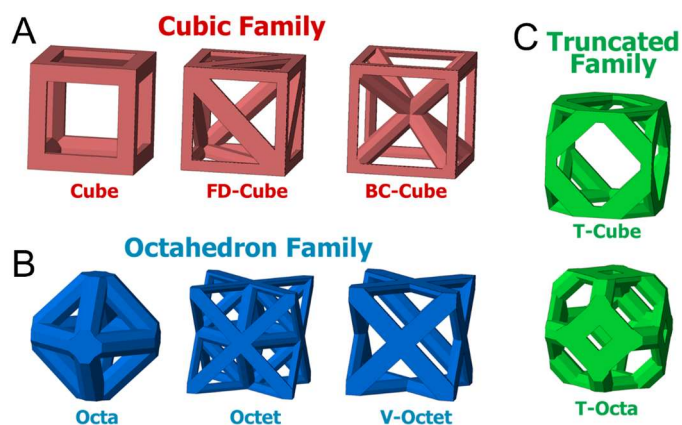
Závěry

Autoři doporučují gyroidní struktury pro aplikace, kde je hlavní podmínkou vyrobitelnost. BCC, hexagonální a gyroidní struktura je navíc vhodná pro aplikace zatížené z několika směrů a při požadované komplexní tuhosti. Ostatní buňky nejsou univerzálně vhodné z důvodu velké anizotropie, která je využitelná pouze u aplikací s jednoduchým namáháním.

Egan, et al. 2017 – Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing [34]

Tým švýcarských vědců vidí potenciál mikro-prutových struktur v úplně jiné oblasti, a to v medicíně, konkrétně v náhradách meziobratlových plotének. Pro tento účel se snaží porovnat různé druhy mikro-prutových struktur z hlediska tuhosti, porosity, propustnosti a poměru povrchu vůči objemu.

Jejich základní knihovna sestává ze tří krychlových mřížek, tří oktaedrických mřížek a dvou jejich zkrácených variant (obrázek 3.18). Průměr prutu je 0,2 mm a velikost buňky se mění v závislosti na požadované relativní hustotě, která je pro jejich účely 0,6 - 0,9.

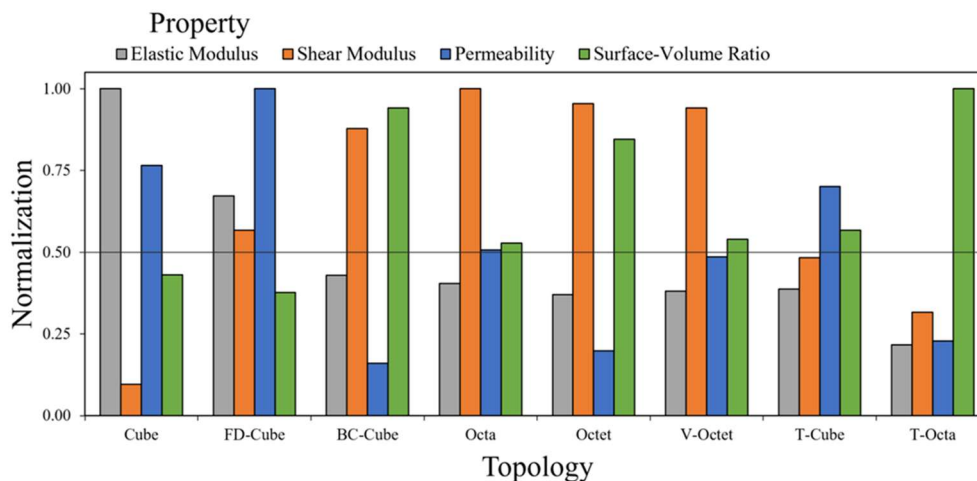


Obr. 3.18: Knihovna použitých typů struktur [34].

Výsledky

Z mechanických simulací porovnávají relativní modul pružnosti v tahu a ve smyku. Ten je získán vydělením modulu pružnosti získaného ze simulace modulem pružnosti základového materiálu, aby byly výsledky nezávislé na volbě materiálu.

Všechny získané hodnoty jsou porovnány v normalizovaném stavu pro konstantní relativní hustotu 0,8 (obrázek 3.19). Z porovnání vyplývá, že největší modul pružnosti v tahu mají krychlové buňky. Naopak oktaedrické mají nejlepší modul ve smyku. Krychlové mřížky mají také velice dobrou propustnost. Další srovnání je pro konstantní relativní modul pružnosti v tahu a velikost póru. Výsledky jsou obdobné jako u prvního srovnání.



Obr. 3.19: Relativní porovnání jednotlivých druhů mikro-prutových buněk [34].

Závěry

Závěrem studie je konstatování, že všechny buňky jsou vhodné pro aplikaci v medicíně, ale silně záleží na požadavcích pro aplikaci. Nelze nalézt univerzální buňku, musí se volit, dle aktuálních potřeb.

Panesar, et al., 2018 – *Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for additive manufacturing* [35]

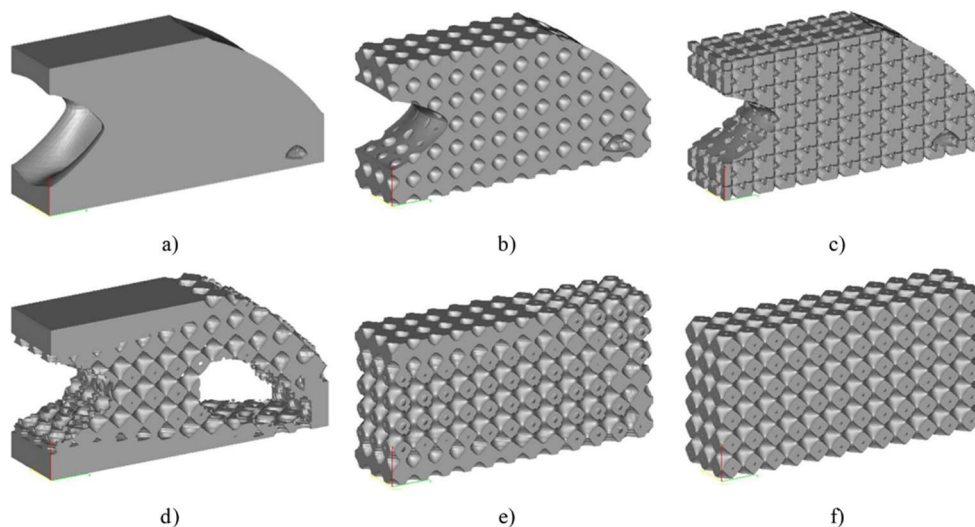
Autoři této studie se zaměřili na porovnání jednotlivých přístupů k využití strukturovaných materiálů při návrhu. První přístup je booleanský průnik klasické objemové optimalizace a prutové struktury, tzn. výsledek topologické optimalizace je kompletně nahrazen strukturovaným materiálem místo plného. Druhý přístup zahrnuje nepenalizovanou SIMP metodu a nahrazení elementů nad určenou horní hranicí plným materiálem, mezi horní a dolní hranicí nahrazení strukturou s příslušnou relativní hustotou a pod dolní hranicí bez materiálu. Třetí přístup představuje nepenalizovanou metodu, jejíž výsledek je posléze přepočítán podle daných hranic relativní hustoty tak, aby byl celý objem vyplněn strukturovaným materiálem. Do porovnání jsou přidány ještě dva extrémní případy. Pouze objemová optimalizace a vyplnění návrhového prostoru uniformní strukturou.

Přístupy jsou porovnávány ze tří hledisek. Mechanická odezva nebo optimálnost řešení, návrhová náročnost a samonosnost designu.

Je zde prezentována zatím nejširší knihovna buněk vhodných pro aditivní výrobu, která zahrnuje jak krychlové buňky, tak implicitní buňky řízené návrhovou rovnicí. Dohromady 24 různých typů.

Výsledky

K porovnání byl využit klasický Michellův nosník, který byl optimalizovaný pomocí SIMP s penalizačním koeficientem 1 a 3. Pro mechanickou analýzu pomocí MKP bylo zvoleno 6 konfigurací, viz obrázek 3.20.

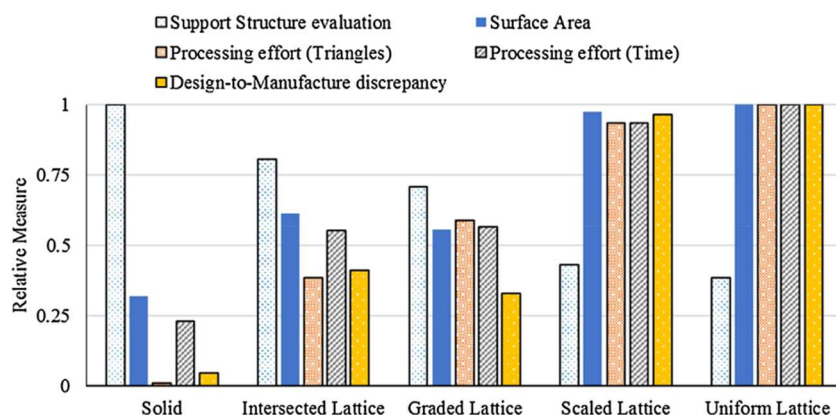


Obr. 3.20: Varianty definované pro mechanické testy a testy samonosnosti [35].

Byly zvoleny dva zátěžné stavy a oba byly navíc ve třech variantách. S přesným zatížením, s malým rozptylem zatěžujících sil a s velkou nejistotou v zatížení. Účelem bylo zjistit robustnost navržených dílů.

Nejhůře (nejmenší tuhost) dle očekávání dopadla uniformní struktura, poté byla struktura přepočítaná na celý objem. Gradientní struktura a průnik byly na stejné úrovni a nejtuzší byl samozřejmě plný materiál.

U vhodnosti pro aditivní výrobu byla situace přesně opačná (obrázek 3.21). Ve srovnání náročnosti zpracování dopadly nejhůře znova strukturované materiály, které zabírají nejvíce místa.



Obr. 3.21: Relativní porovnání jednotlivých přístupů k použití strukturovaného materiálu [35].

Závěry

Autoři poukazují na výhodnost spojení topologické optimalizace a strukturovaného materiálu. Zároveň dodávají, že použití konkrétních buněk je vždy závislé na požadované aplikaci. Buňky, které jsou plošně specifikované, mají například menší sklon k tvoření buněk na okraji, které již nepřenáší zatížení, což je způsobeno jejich menší provázaností.

Feng, et al., 2018 – An investigation of the mechanical properties of metallic lattice structures fabricated using selective laser melting [36]

Studie se zabývá vývojem metody pro jednoduchou analytickou predikci chování mikro-prutových struktur. Je uvažována jednoduchá BCC buňka a její zpevněné varianty BCCZ a FBCC. Analytický model je založen na klasické prutové teorii, kdy pro každou buňku je zvolen typický uvolněný prut a na jeho základě jsou předpovězeny jeho elastické vlastnosti.

Navržený model je verifikován pomocí MKP a experimentu se strukturami vyrobenými pomocí technologie SLM z titanové slitiny Ti6Al4V.

Výsledky

Byly provedeny tlakové zkoušky na vzorcích o straně 24 mm se 4 buňkami v řadě. Konstantní byl průměr prutu 0,52 mm. Výsledky ukazují dobrou shodu mezi teoretickým a experimentálním řešením.

Závěry

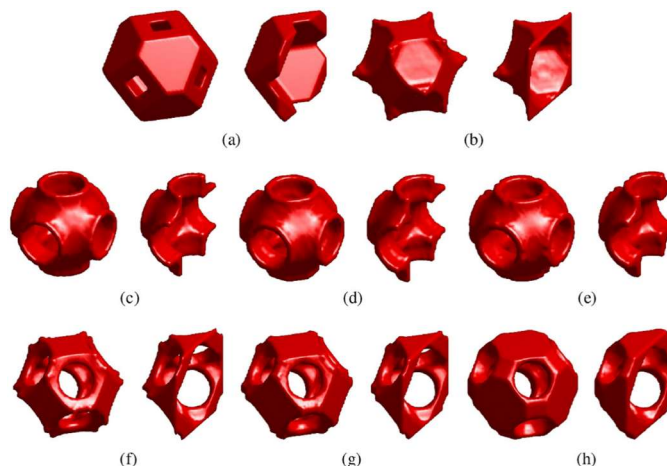
Chování mikro-prutových struktur lze při jednoduchém tlakovém zatížení efektivně modelovat pomocí klasické prutové teorie. Otázkou je, jaká by byla přesnost predikce při jiném nebo kombinovaném zatěžování.

Takezawa, et al., 2018 – Isotropic Ti-6Al-4V lattice via topology optimization and electron-beam melting [37]

Článek je zaměřen na vývoj základové buňky strukturovaného materiálu, která by byla vhodná pro práškové kovové technologie, a zároveň by strukturovaný materiál vykazoval izotropní vlastnosti. Pro zajištění izotropie je použita topologická optimalizace. Z hlediska

mechanických vlastností je nejužší tvar plná skořepina, ale ta není vhodná pro práškové aditivní technologie. Proto byly do návrhu přidány díry pro vysypání nepoužitého prášku.

Zajímavé je, že pro topologickou optimalizaci by la použita málo známá metoda Phase-fiel. Vyzkoušeno bylo několik variant (obrázek 3.22) s různými počátečními (díry ve středech ploch nebo v rozích) a okrajovými podmínkami (20 %, 25 %, 30 % objemový podíl). Nejlepší výsledek byl vyroben pomocí technologie Electron Beam Melting (EBM) z titanové slitiny Ti6Al4V. Vyrobeny byly tři sady vzorků, každý s jinak natočenou strukturou pro tlakové zkoušky dle zadaných vektorů.



Obr. 3.22: a) základní tvar, b) optimalizovaný tvar bez děr, c-e) optimalizovaný tvar s děrami ve středech stěn, f-h) optimalizovaný tvar s děrami v rozích [37].

Výsledky

Byly stanoveny efektivní moduly pružnosti dle MKP a ty byly porovnány s experimentem. Bylo ukázáno, že experimentálně zjištěná tuhost je až o 20 % nižší. To autoři přičítají typicky špatné struktuře povrchu dílů z EBM. Výsledky pro různé objemové podíly ukazují, že navržený strukturovaný materiál je v dostatečném měřítku izotropní s maximálními odchylkami 9 %.

Závěry

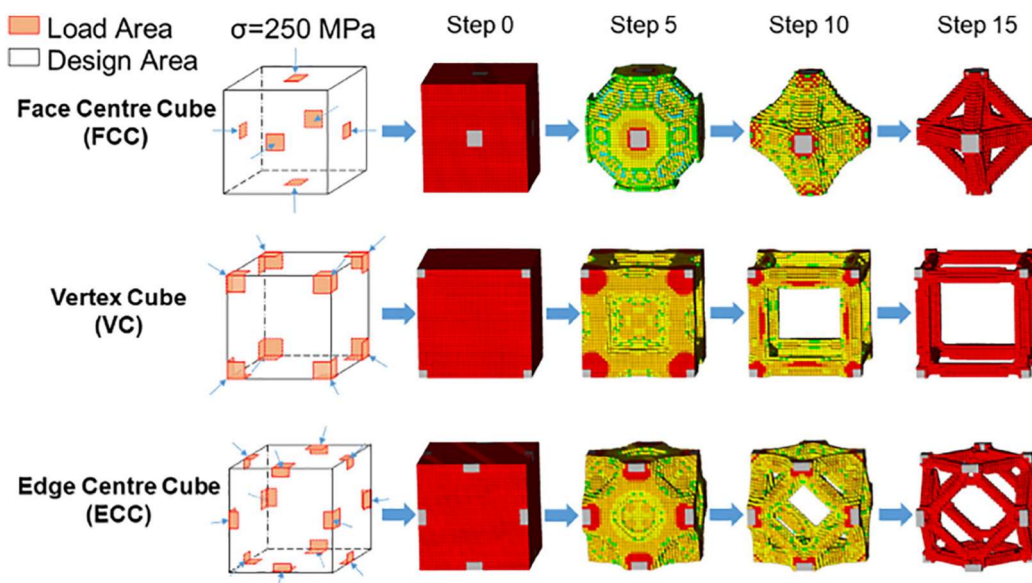
Výsledky ukazují, že lze navrhnout strukturovaný materiál tak, aby byly jeho mechanické vlastnosti izotropní nejen ortotropní. Zároveň je díky topologické optimalizaci a technologickým podmínkám vhodný pro aditivní výrobu. Otázkou zůstává, jak se výsledky změní, pokud bude použita jiná technologie, například SLM.

Xiao, et al., 2018 – Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting [38]

Ve většině předchozích studií nebyla volba struktur speciálně vysvětlována. Proto se tato studie věnuje návrhu základové mikro-prutové buňky na základě topologické optimalizace. Jsou zvoleny tři zatěžovací módy (obrázek 3.23). Tlakové zatížení je v prvním aplikováno na středy stěn krychle (FCC), ve druhém na vrcholy (VC) a ve třetím na středy hran (ECC).

Pomocí technologie SLM jsou poté struktury vyrobeny pomocí SLM z nerezové oceli 316L v několika variantách objemového podílu. Jsou provedeny tlakové testy a jsou definovány vztahy pro Gibson-Ashbyho analytický model.

Vyráběné struktury mají délku hrany 18 mm s 8 buňkami v řadě.



Obr. 3.23: Definice tří typů okrajových podmínek a postup topologické iterace [38].

Výsledky

Topologická optimalizace navrhla nejjednodušší topologie, a to prutové propojení jednotlivých zátěžných bodů. Je ukázáno, že topologie FCC a VC mají lepší mechanické vlastnosti, ale buňka ECC má větší absorpci energie.

Závěry

U buněk je kontrolována geometrická přesnost, ale není relativně vyjádřena k velikosti prutů. Na vodorovných prutech jsou vidět evidentní defekty.

Topologicky optimalizované buňky jsou porovnávány s daty jiných struktur z jiných článků a ukazují ve většině případů lepší mechanické vlastnosti optimalizovaných struktur.

3.3 Potřebné materiálové vstupy do optimalizace

Ačkoliv je reálné chování materiálů důležitým vstupem do optimalizace i pevnostní analýzy, je výzkum materiálů obecně velice obsáhlý problém. Proto zde budou zmíněny pouze dosažitelné mechanické vlastnosti, se speciálním zaměřením na vliv tepelného zpracování, které je nedílnou součástí výrobního procesu.

Práce bude z pohledu aditivní výroby zaměřena hlavně na hliníkové slitiny, konkrétně siluminy. Stěžejními materiály bude slitina AlSi10Mg a příbuzná slitina AlSi7Mg0,6, která je certifikovaná pro letecký průmysl.

Mertens, et al., 2015 – *Thermal treatments of AlSi10Mg processed by laser melting* [39]

Autoři se zaměřují na vliv dvou typů tepelného zpracování na mikrostrukturu, tvrdost a tahové vlastnosti aditivně zpracované hliníkové slitiny AlSi10Mg. Prvním typem je žhání

ke snížení vnitřního napětí na 250 °C po dobu 2 hod a druhým je rozpouštěcí žihání na 510 °C po dobu 6 hodin a stárnutí při teplotě 170 °C po dobu 4 hodin.

Výsledky

Dosáhnuté hodnoty autoři porovnávají jednak s hodnotami z jiných článků a jednak s hodnotami odlívaného materiálu. U tvrdosti mají horší výsledky i v as-built stavu, než byla reference. U obou tepelných zpracování tvrdost navíc ještě klesla. V ostatních mechanických vlastnostech je as-built stav srovnatelný s odlívaným materiálem. Mez kluzu se při žihání snížila, ale při aplikaci rozpouštěcího žihání a stárnutí vzrostla. Mez pevnosti u obou zpracování klesla pod as-built stav.

Na druhou stranu prodloužení vzrostlo o 80 % při žihání a o 220 % při rozpouštěcím žihání a stárnutí. V prvním případě autoři tento jev vysvětlují pouze odstraněním zbytkových napětí, protože mikrostruktura se oproti as-built stavu nezměnila. V případě rozpouštěcího žihání se ale lamelární eutektická struktura změnila na globularizovanou, což má za následek zlepšenou tažnost.

Závěry

Obě tepelné zpracování znamenají snížení meze pevnosti a tvrdosti, naopak zvýšení tažnosti. Mez pružnosti dokáže zvýšit pouze rozpouštěcí žihání kombinované s umělým stárnutím.

Aboulkhair, et al., 2016 – *The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment* [40]

Maskery, et al., 2016 – *A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting* [41]

Obě studie jsou od jednoho týmu autorů z University of Nottingham. V prvním článku se zaměřují na vliv rozpouštěcího žihání následovaného kalením ve vodě a umělým stárnutím (T6 zpracování) na mechanické vlastnosti na nano, mikro a makro úrovni. Mikro a nano mechanické vlastnosti jsou zjišťovány pomocí tvrdosti dle Vickerse a makro vlastnosti pomocí tahové a tlakové zkoušky.

Ve druhém článku je stejné zpracování použito na mikro-prutovou strukturu. Byly porovnávány čtyři sady vzorků s BCC strukturou o velikosti krychlí 18 mm s 6 buňkami na hranu. Dvě sady byly s uniformní relativní hustotou 0,22 a dvě byly s gradientní strukturou, která rostla z 0,139 po 0,301. Jedna uniformní struktura a jedna gradientní byla ponechána v as-built stavu a druhé byly tepelně zpracovány.

Výsledky

Vliv T6 zpracování na materiál AlSi10Mg je dle první studie převážně špatný (obrázek 3.24). Na všech třech úrovních klesla po zpracování tvrdost. Klesla také mez kluzu a pevnosti. Jediná vlastnost, která se zlepšila, tak byla tažnost.

Toho autoři využili při druhé studii, kdy bylo záměrem díky tepelnému zpracování získat strukturu s větší absorbcí energie. Díky tepelnému zpracování nebyl u struktur pozorován typický křehký lom a struktury po prvotním zlomu a plasticitě získávaly zpět určité vlastnosti. Proto byl jejich kolaps daleko předvídatelnější. U gradientních struktur navíc nedocházelo k typické pásové deformaci, ale kolabovaly jednotlivé vrstvy za sebou.

Property	Effect of heat treatment (%)
Nano-hardness	$-(16 \pm 1)$ ↓
Micro-hardness	$-(20 \pm 1)$ ↓
Ultimate tensile strength	$-(12 \pm 5)$ ↓
Yield tensile strength	$-(11 \pm 1)$ ↓
Tensile elongation at failure	$+(179 \pm 57)$ ↑
Compressive strength at 25% strain	$-(56 \pm 0.003)$ ↓
Yield compressive strength	$-(47 \pm 2)$ ↓

Obr. 3.24: Souhrn vlivu zpracování T6 na materiál AlSi10Mg [40].

Závěry

Dle tohoto týmu autorů je T6 zpracování nevhodné z hlediska většiny mechanických vlastností ale je velice vhodné z hlediska tažnosti. Toto zpracování tak umožňuje daleko lepší chování mikro-prutových struktur při použití jako absorbérů energie.

Rao, et al., 2019 – *The processing and heat treatment of selective laser melted Al-7Si-0.6Mg alloy* [42]

Jedna z mála studií, která se alespoň částečně zabývá tepelným zpracováním aditivně zpracované slitiny AlSi7Mg0,6. V první části článku se autoři zaměřují na nalezení optimálních procesních parametrů pro zpracování této slitiny pomocí SLM. V druhé části se věnují zjištění mechanických vlastností, a protože tepelné zpracování je nedílnou součástí procesu, zkoumají jeho různé varianty. Navrhují pět zajímavých kombinací tepelných zpracování:

1. Pouze umělé stárnutí na 165 °C po dobu 2 hodin.
2. Rozpouštěcí žíhání na 535 °C po dobu 1 hodiny a stárnutí na 165 °C po dobu 6 hodin.
3. Žíhání ke snížení vnitřního napětí na 300 °C po dobu 2 hodiny.
4. Žíhání na 300 °C na 2 hodiny a umělé stárnutí na 165 °C na 2 hodiny.
5. Žíhání na 300 °C na 2 hodiny a T6 zpracování se stejnými parametry jako u 2.

Výsledky

Zajímavé je, že autoři neporovnávají výsledky s as-built stavem. Předpokládají nutnost snížení vnitřních napětí, a proto praktické stavy materiálu jsou pouze tepelně zpracované. Jako reference jim slouží standardizované vlastnosti pro litý materiál v T6 stavu.

Tažnost je u všech vzorků lepší než u litého materiálu s maximem při zpracování 3 a 4. Naopak u těchto zpracování je nejnižší mez kluzu a pevnosti. Autoři nepozorují rozdíl mezi zpracování m 2 a 5. Z toho vyvozují, že T6 zpracování má na zbytkové napětí stejný vliv jako žíhání k jeho odstranění. Maximálních pevnostních charakteristik dosahuje samotné umělé stárnutí.

Závěry

V této studii jsou použity velice zajímavé kombinace tepelných zpracování, které se neobjevují jinde v literatuře. I tak ale docházejí autoři k závěru, že nejlepší zpracování pro slitinu AlSi7Mg0,6 je rozpouštěcí žíhání s umělým stárnutím.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Tato kapitola se bude zabývat analýzou článků a poznatků uvedených v kapitole 3. Je rozdělena na čtyři části dle klíčových bodů, které musí být rozhodnuty, aby mohl být definován cíl práce. První část se bude zabývat optimalizačním přístupem, který bude nejvhodnější pro návrh dílů s použitím více druhů mikro-prutových struktur. Druhá část se bude věnovat porovnání používaných druhů strukturovaných materiálů a jejich vhodnosti pro kombinaci. Třetí část se zaměří na metody, kterými se strukturované materiály studují, a poslední část se bude věnovat materiálovým vlastnostem, které se používají.

4.1 Optimalizační přístupy: vědecké vs. praktické

V první části přehledu současného stavu poznání řešené problematiky byly představeny vybrané algoritmy nebo přístupy k optimalizování dílů s využitím strukturovaného materiálu ať už s uniformní nebo různě variabilní strukturou. Ve druhé části byl zařazen článek, který experimentálně porovnával (proto byl zařazen do experimentální nikoliv algoritmičké části) různé zmíněné i nezmíněné přístupy k optimalizaci.

Za základ novodobé topologické optimalizace se považuje homogenizační teorie. Ta už v principu pracuje s materiálem, který má ve své struktuře kavity s různou velikostí, a tak mění své vlastnosti v prostoru. Bendoe a Kikuchi [4] původně předpokládali, že vlastnosti materiálu se mění v každém bodě. Z praktických důvodů poté vznikla řada tzv. hustotových metod, které umožňují měnit vlastnosti materiálu po jednotlivých elementech konečnoprvkové sítě. Chyběla ale konkrétní představa o tom, jak tyto materiálové vlastnosti zajistit. Na základě toho vznikla myšlenka dvou úrovně optimalizace [8], která rozděluje proces na optimalizaci tvaru součásti a optimalizaci struktury materiálu. Liší se ale v pojetí.

Rodriguez et al. [8], Coelho et al. [9], a Xia a Breitkopf [15] zvolili přístup, při kterém je zvlášť optimalizovaná definovaná oblast a každá buňka sítě, která je rozdělena na subelementy. To znamená, že pokud má konečnoprvková síť N elementů a jeden element má M subelementů, poté je potřeba vyřešit problém o velikosti $N \times M + N$. To může být u větších úloh obrovský problém. Řešením může být samozřejmě paralelizace, ale i tak je potřeba takto rozsáhlé problémy řešit v každé iteraci. Podobné řešení navrhuje i Sivapuram [16], ale ten krom možnosti paralelizace nabízí parametr, který určí maximální počet různých buněk v optimalizované doméně. Pokud je zvolena jako N , pak je problém stejně velký jako u výše zmíněných prací. Pokud je N dostatečně malé, je tato metoda použitelná pro praktické úlohy v reálném čase. Pokud je parametr nastaven na 1, poté je strukturovaný materiál uniformní.

Ke stejnému řešení výpočtové náročnosti dospěli i Yan et al. [11] a Liu et al. [10]. Ačkoliv jeden použil optimalizační metodu BESO na obou úrovních a druhý SIMP na mikroúrovni a PAMP na makro úrovni, základní myšlenka byla stejná. Pokud dosáhnou optima na obou úrovních, tak musím mít optimální díl. Krom výpočtové jednoduchosti byly tyto metody navrženy jako výrobně přijatelnější právě z důvodu jednotné struktury.

U všech výše zmíněných metod může nastat problém se spojitostí struktury. Wang et al. [17] navrhuje jako řešení v prvním kroku vytvořit knihovnu relativních hustot jednoho typu buňky, které mají stejné připojovací prvky a spojí se tedy vždy. Ale i u buněk, které jsou

vždy propojené, může nastat případ, že nejsou samonosné, takže pro zdejší aplikaci taky nejsou vhodné.

Naopak u přístupů, které se dostaly do praxe, je velice častým úkazem využití MKP nebo jiné sítě [18, 23]. Tím pádem vznikají prostorové strukturované objekty, které jsou od určité velikosti elementů vyrobitelné pouze plastovými technologiemi, protože obsahují množství horizontálních prutů. Pokud je design zaměřen přímo na kovové aditivní technologie, objevuje se zpravidla výhradně BCC buňka. Posledním krokem u všech praktických aplikací je variace BESO algoritmu, která optimalizuje jednotlivé pruty struktury.

Ze srovnání, které provedl Panesar a jeho tým [35] plyne jako nejlepší metoda optimalizace mapování uniformních buněk na nepenalizovanou SIMP metodu v určitém rozsahu středních hustot. Ke stejné kombinaci objemu a mikro-prutových struktur dospěl vývoj ve firmě LK Engineering [24], který zde není prezentován, protože není veřejný. Do třetice tento postup doporučují po osobních konzultacích také experti na topologickou optimalizaci pracující pro společnost Altair Engineering [25] respektive jejich české zastoupení Advanced Engineering.

Hlavní závěry a rozhodnutí týkající se optimalizační procedury:

- Jako nejvhodnější postup se jeví definice vlastní knihovny struktur, které budou už ze své podstaty samonosné a navzájem kompatibilní.
- Nejvýhodnější je namapování knihovny struktur na nepenalizované řešení SIMP algoritmu.
- Nejlepší pevnostní výsledky dává i dle praktických zkušeností kombinace objemových buněk, strukturovaných buněk a prázdných míst. Čili strukturovaný materiál se efektivně využívá pouze pro střední hodnoty relativních hustot.

4.2 Používané základní buňky: mikro-prutové vs. ostatní

Buňky, ze kterých se skládají strukturované materiály, vzniklé víceúrovňovou optimalizací jsou pro praktické použití nevhodné. Proto se zde budou porovnávat pouze buňky mikro-prutové a jiné, které byly reálně vyrobeny.

Z hlediska četnosti vedou mikro-prutové buňky, hlavně BCC, které už z historického hlediska byly nejvíce používané pro svou asi nejjednodušší vyrobitelnost. Zároveň se jejich chování při různých relativních hustotách blíží aproximovanému materiálu dle penalizačního principu používaného u metody SIMP.

Mezi ostatní buňkami vedou implicitně definované matematickými vztahy, které mají tu výhodu, že jsou už z definice samonosné. Několik studií se věnovalo porovnání různých druhů struktur. Aremu [31] a Hanzl [33] se se svými týmy věnovali porovnání několika druhů mikro-prutových buněk a gyroidní buňky, která je nejčastějším zástupcem matematicky definovaných struktur. Porovnání v obou případech ukázalo, že gyroidní struktura je srovnatelná s BCC mřížkou. V obou případech se ale ukázalo, že existují uspořádání základní buňky, které gyroidní buňku převyšují v mechanických vlastnostech v určitých směrech zatížení. Krom konfigurací, které mají pruty ve směru zatížení jako je typicky struktura BCCZ [30–33, 36] se v několika studiích objevila struktura PFCC (nebo FCCZ) [31–33], která vyšla jako nejlepší z hlediska tuhosti při zatížení ve směru stavby.

Jak ukázal Aremu et al. [31], a Hanzl et al. [33], existuje výrazná závislost mechanických vlastností na směru jejich zatěžování. Důvodem je topologie buněk, které jsou přizpůsobeny

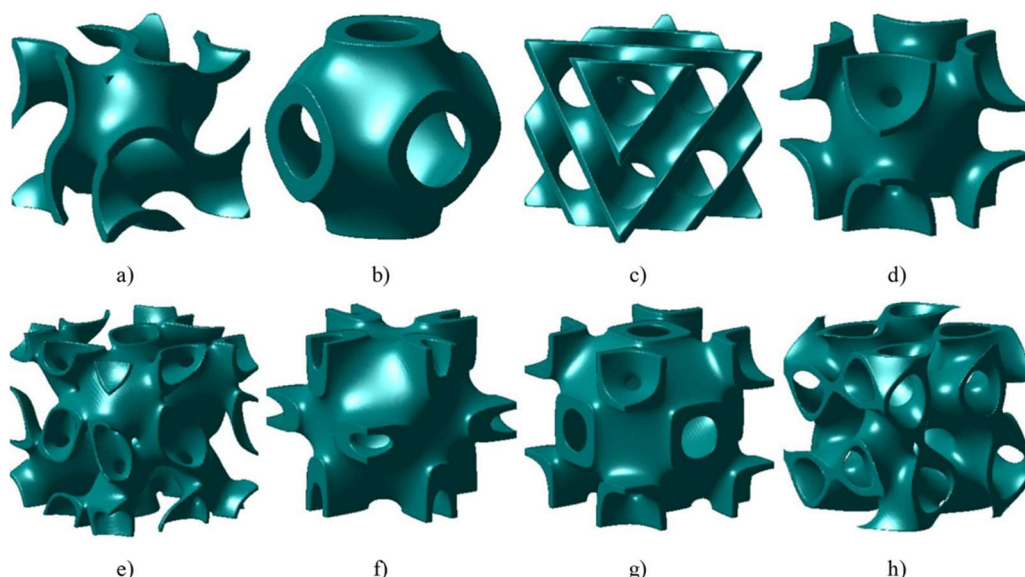
aditivní výrobě a směru stavby. U struktur složených z krychlových prvků je anizotropie často relaxována na ortotropii neboli změnu vlastností v na sebe kolmých směrech.

Se směrem zatěžování souvisí také typ zatěžování. U některých studií byl krom modulu pružnosti v tahu/tlaku dopočítán také modul pružnosti ve smyku [31, 34]. Takové porovnání ukazuje, že buňky, které jsou vhodné pro tlakové namáhání, nemusí být vůbec vhodné pro smykové. Typickým příkladem je FCC buňka.

Smith et al. [30] a Leary et al. [32] se krom studia mechanismů poškození struktur soustředili na vyrobiteľnost. Zjistili, že pokud se pruty staví pod větším úhlem, mají lepší mechanické vlastnosti. Leary [32] navíc ukázal, že nelze postavit pruty, které mají horizontální orientaci.

Takezawa [37] a Xiao [38] se snažili se svými týmy najít ideální základovou buňku pomocí topologické optimalizace. Zatím, co Takezawa představil typ buňky vhodný pro kovovou aditivní výrobu s isotropními vlastnosti v makro měřítku, Xiao představil tři druhy, které lze vyrábět pouze při malé velikosti jednotlivých elementů, protože obsahují vodorovné pruty.

Panesar [35] představuje knihovnu až 24 různých druhů mikro-prutových struktur, z čehož některé mají velice slibné vlastnosti a jsou dobře aditivně vyrobiteľné. Plošné struktury navíc mají menší sklon k tvoření nezatižených okrajových elementů. I přes všechny tyto klady mají zásadní negativum pro tuto práci, protože každá má jiné přípojně rozměry, respektive velice těžko na sebe mohou různé buňky navazovat, viz obrázek 4.1.



Obr. 4.1: Příkladů implicitních buněk, které ale nejdou mezi sebou propojit [35].

Jedním z hlavních závěrů studií [31, 33–35] je tvrzení, že nelze vybrat jeden druh univerzální buňky pro všechna použití. Nejen z mechanického hlediska [31, 33, 35], ale taky pro přestup tepla, kde je důležitý poměr povrchu a objemu, nebo prostupnosti při proudění [34].

Hlavní závěry a rozhodnutí týkající se základních buněk:

- I přes zjevná pozitiva implicitních struktur je pro tuto práci nutné použít mikro-prutové struktury díky své možné návaznosti.
- Mikro-prutové struktury trpí velkou anizotropií.
- Je důležité zkoumat nejen tlakové/tahové zatížení ale i tuhost ve smyku.

- Neexistuje univerzální buňka na všechny aplikace. Pro různé požadavky je potřeba použít jiné buňky.

4.3 Studium struktur: teoretické vs. experimentální

V literatuře se objevují zpravidla 4 přístupy ke studiu a předpovídání chování strukturovaných materiálů. Je to teorie chování strukturovaných materiálů dle tzv. Gibson-Ashbyho modelu, klasická prutová teorie, studium pomocí metody konečných prvků, anebo určení efektivních mechanických vlastností z experimentálního studia reálně vyrobených strukturovaných materiálů.

Gibson-Ashbyho [27, 28] model je založený na závislosti mechanických vlastností na topologii buňky, základovém materiálu a relativní hustotě. Ačkoliv byl původně vyvinut hlavně pro popis chování pěn, lze jej dobře aplikovat i na aditivně vyráběné struktury [38]. Jak ale uvádí Maskery et al. [41], kteří počítali koeficienty pro tento model i na gradientních strukturách, je model velice zjednodušující a při gradientních strukturách omezeně použitelný. Pokud by tedy byla součástí z více druhů buněk a s různou relativní hustotou, pak nemá aplikace Gibson-Ashbyho modelu smysl.

Feng et al. [36] a Smith et al. [30] zkoumají možnosti aplikace klasické prutové teorie na mikro-prutové struktury. Výsledky ukazují dobrou shodu s experimentálními daty. Nahrazení struktur pruty je používáno i u komerčního algoritmu Optistruct a s pruty už ze své podstaty počítají i praktické algoritmy v [18, 23]. Dá se ale ukázat, že u větších relativních hustot nad 0,5 už prutová teorie nebude fungovat, protože pruty zde obsažené už mají tak velkou interferenci s okolím, že nesplňují základní předpoklady o štíhlosti prutu.

Většina prací se zabývá porovnáním experimentálních dat s výpočtem pomocí MKP [30–32, 36–38]. Pokud je vzorek dostatečně malý, dá se efektivně použít objemových prvků, ať už přímo popisujících geometrii [30, 32, 36], nebo je geometrie nahrazena voxelovou sítí [31]. Takový postup je ovšem prakticky nepoužitelný pro reálné díly a pokud mikro-prutové struktury nesplňují prutové předpoklady, tak skoro jedinou možností je homogenizace, která je s výhodou používána u optimalizačních algoritmů pro popis chování jednotlivých typů struktur [8, 9, 16]. Alternativu dává pouze přístup FE^2 [15], který nepoužívá homogenizaci, ale průměruje zjištěné hodnoty na jednotlivých prvcích a používá je v globálním popisu.

Všechny tyto přístupy bývají porovnávány s experimentálními daty. Ve valné většině je to tlaková zkouška [30, 32, 33, 36–38, 41] a ostatní druhy mechanických testů úplně chybí. To je zářející fakt, protože jak dokázali Hanzl et al. a Aremu et al. [31, 33], buňky jsou anizotropní a jednoduché testování na tlak v jednom směru není dostačující. Ve studii Egana et al. [34] je navíc ukázáno, že buňky jsou citlivé na rozdíl v namáhání v tahu/tlaku a ve smyku.

Největší smysl pro praktické využití tak dává postup navržený Chengem et al [22], ve kterém jsou nejprve experimentálně zjištěny efektivní hodnoty mechanických vlastností a ty jsou poté použity ve výpočtu.

Hlavní závěry a rozhodnutí týkající se studia chování a jeho implementace:

- Gibson-Ashbyho model je obtížně využitelný u gradientních struktur.
- Prutová teorie je omezeně využitelná pouze pro menší hodnoty relativních hustot.
- Homogenizace jednotlivých buněk, je nejpoužívanější popis chování struktur do globálních výpočtů. Jedinou praktickou alternativou je pouze metoda FE^2 .

- Při experimentálních testech by měla být zkoumána i únosnost struktur při smyku a v různých orientacích.

4.4 Mechanické vlastnosti: aproximované vs. reálné

Mechanické vlastnosti nejsou ve většině zmíněných algoritmů a postupů brány jako velký problém. U některých studií jsou záměrně brány jednotkové velikosti modulu pružnosti, aby byly modely nezávislé na zvoleném materiálu [34]. U penalizačních metod [5, 7, 10] se předpokládá, že mechanické vlastnosti jsou závislé pouze na relativní hustotě buňky. Do větších souvislostí to poté dává Gibson-Ashbyho model [27, 28], který ukazuje závislost na topologii, která je dokázána i experimentálně [31, 33, 34]. Cheng et al. [22] navrhuje úplně vypustit homogenizaci struktur, a nahradit je reálně změřenými vlastnostmi buněk o jednotlivých hustotách.

Problémem u aditivně vyráběných materiálů je fakt, že neexistuje univerzální popis jejich chování. Díky způsobu výroby jsou totiž jejich vlastnosti závislé na směru zatížení. U aditivně vyrobených mikro-prutových struktur se tím pádem jedná o dvojitou anizotropii – materiálovou a geometrickou. Toto nasimulovat a verifikovat by bylo velice obtížné, a navíc použitelně pouze pro jeden druh materiálu. Takže znova vychází nejlépe postup navržený Chengem et al. [22] o použití reálně zjištěných parametrů do výpočtu.

Aby mohly být zjištěny reálné vlastnosti mikro-prutových struktur, musí být simulovány reálné podmínky při výrobě dílů. Nedílnou součástí aditivní výroby je tepelné zpracování, které musí být provedeno za účelem snížení zbytkového napětí [39, 42]. Proto je důležité nejprve definovat správné postupy pro uvažované materiály. Nabízí se zde dva směry zpracování. Prvním je žíhání ke snížení vnitřního napětí, které může snížit materiálovou anizotropii, ale zároveň snižuje mechanické vlastnosti [39, 42]. Druhým směrem je zpracování T6, které má dobrý vliv na mechanické vlastnosti [39–42] ale zase není znám jeho vliv na zbytkové napětí.

Hlavní závěry a rozhodnutí týkající se mechanických vlastností:

- Díky aditivní výrobě je použitý materiál vždy anizotropní. U mikro-prutových struktur je tím pádem anizotropie dvojitá.
- Je potřeba do výpočtu dát reálná data, nikoliv aproximovaná na základě hustoty.
- Je potřeba definovat správnou post-processingovou proceduru pro tisk reálných mechanických vlastností.

4.5 Závěry analýzy

Ze závěrů jednotlivých podkapitol vyplývají následující místa, na která by se měla disertační práce zaměřit, protože chybí pro návrh algoritmu s použitím více typů mikro-prutových struktur:

- Je potřeba definovat technologický postup při výrobě a na jeho základě vyrobit zkušební vzorky.
- Zjistit reálné vlastnosti všech použitých typů mikro-prutových struktur, a to nejen v tahu/tlaku, ale i ve smyku.
- Pokud není pouze jedna buňka, která by udala knihovnu pro všechny relativní hustoty, je potřeba porovnat mechanické vlastnosti a stanovit základní knihovnu pro algoritmus.
- Je potřeba upravit SIMP algoritmus pro použití více typů základních buněk z knihovny.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Podstata disertační práce spočívá v prozkoumání nových možností při navrhování ultra lehkých komponent vyráběných aditivními technologiemi. Tato oblast s vysokým potenciálem stále naráží na obtíže při efektivním praktickém využití, kterým je potřeba se věnovat.

5.1 Zaměření disertační práce

V drtivé většině vyrobených součástí navržených s pomocí mikro-prutových struktur se objevuje jako základní element tělesově středěná mřížka krychle, tzv. BCC buňka. Ta je použita kvůli své jednoduchosti, samonosnosti, relativní izotropii a dobré návaznosti mezi jednotlivými buňkami. Existují i další jednoduše definovatelné základní buňky, které jsou ovšem anizotropní. Díky tomu mají ale v některých směrech lepší mechanické vlastnosti než BCC buňka. Zároveň lze tyto buňky dobře navázat na BCC buňku. Nabízí se tedy úvaha o kombinaci několika druhů elementárních buněk v jedné komponentě. Tento přístup zatím nebyl nikde publikován.

5.2 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je prozkoumat efektivitu kombinace několika druhů mikro-prutových elementárních buněk při návrhu součástí. Nejprve bude chování jednotlivých druhů studováno numericky a poté bude porovnáno s reálným chováním zjištěným experimentálně. Nakonec bude efektivita verifikována pomocí návrhu konkrétní součásti. Ta bude vyrobena a porovnána s komponentou navrženou softwarem od společnosti Altair Engineering, která má vedoucí roli na poli komerční topologické optimalizace.

Pro dosažení globálního cíle je potřeba splnit dílčí cíle, které jsou rozděleny obdobně jako kapitoly 3 a 4 do tří hlavních částí:

Studium chování mikro-prutových struktur

- Definice mikro-prutových struktur vhodných pro aditivní výrobu.
- Studium chování mikro-prutových struktur při elementárním tlakovém, tahovém a smykovém zatížení ve všech třech směrech.
- Klasifikace mikro-prutových struktur dle relativní hustoty a modulu pružnosti.
- Aditivní výroba a experimentální ověření chování mikro-prutových struktur.
- Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace.

Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu

- Definice vhodných druhů tepelného zpracování hliníkových slitin.

- Studium vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.
- Studium vlivu tepelného zpracování na zbytkové napětí.
- Ověření poznatků na strukturách.

Topologická optimalizace a algoritmus návrhu

- Vypracování a ověření metodiky pro kvalitní návrh objemově topologicky optimalizovaných součástí pro aditivní výrobu.
- Implementace vyhodnocovacího algoritmu do SIMP metody.
- Návrh skriptu pro přiřazování jednotlivých typů struktur do komponenty.
- Návrh ověřovací komponenty klasickým a inovativním způsobem.

5.3 Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Vědecká otázka č. 1:

Jak se projevuje anizotropie mikro-prutových buněk při elementárním tlakovém a smykovém zatížení ve všech třech směrech pro celý rozsah relativních hustot?

Pracovní hypotéza č. 1:

Z nekonečného množství možností rozložení materiálu v buňce je pouze malý počet efektivně aditivně vyrobitelný, proto bude možné testovat jednotlivé konfigurace. Struktury, které budou mít lépe rozložený materiál ve vztahu k elementárnímu zatížení, budou mít při stejné relativní hustotě větší tuhost. Na základě toho bude možné pro každou kombinaci relativní hustoty a směru zatížení určit nejvhodnější typ buňky.

Odůvodnění hypotézy č. 1:

Vyrobitelnost mikro-prutových struktur závisí na jejich orientaci [32] a musí být při zatěžování brána v úvahu. Jak dokázal Hanzl a Aremu [31, 33], běžně používané struktury jsou velmi anizotropní. Proto nestačí pouze tlakové nebo tahové zkoušky, kterými jsou struktury zkoumány například v [30, 32, 41]. Při stanovování deformačních vlastností mikro-prutových struktur se musí navíc dopočítat tuhost a modul pružnosti při smykovém namáhání [34]. Jak teoreticky ukázal už Rodrigues [8], nejvýhodnější rozložení materiálu se mění jak s ohledem na typ zatížení, tak s ohledem na relativní hustotu. Egan [34] na omezeném rozsahu a jednoduchém zatížení experimentálně ukazuje, že vhodnost jednotlivých typů struktur je opravdu závislá na relativní hustotě.

Vědecká otázka č. 2:

Jakým způsobem je vhodné zpracovat aditivně vyrobené hliníkové slitiny Al-Si, aby dosahovaly vysokých pevnostních charakteristik a zároveň minimálních hodnot zbytkového napětí?

Pracovní hypotéza č. 2:

Při použití zpracování T6 budou zachovány pevnostní charakteristiky a zároveň dojde k dostatečnému snížení vnitřního napětí.

Odůvodnění hypotézy č. 2:

Dle výzkumu Mertense [39] a Aboulkhaira [40] je T6 jediné tepelné zpracování, které dokáže zachovat pevnostní charakteristiky srovnatelné s as-built stavem. Nikde ale není vyhodnocen jeho vliv na zbytkové napětí. Vzhledem k tomu, že rozpouštěcí žíhání je na vyšší teplotě, než je klasické žíhání pro snížení vnitřního napětí, mělo by být dostatečné k jeho efektivnímu snížení, stejně jako to předpokládá Rao [42].

Vědecká otázka č. 3:

Jak se změní hmotnost součásti, bude-li při optimalizaci použito několik druhů mikro-prutových struktur a ne pouze BCC struktura?

Pracovní hypotéza č. 3:

Hmotnost součásti může oproti klasickému přístupu s jedním typem buňky klesnout v řádu desítek procent díky správné volbě mikro-prutové struktury.

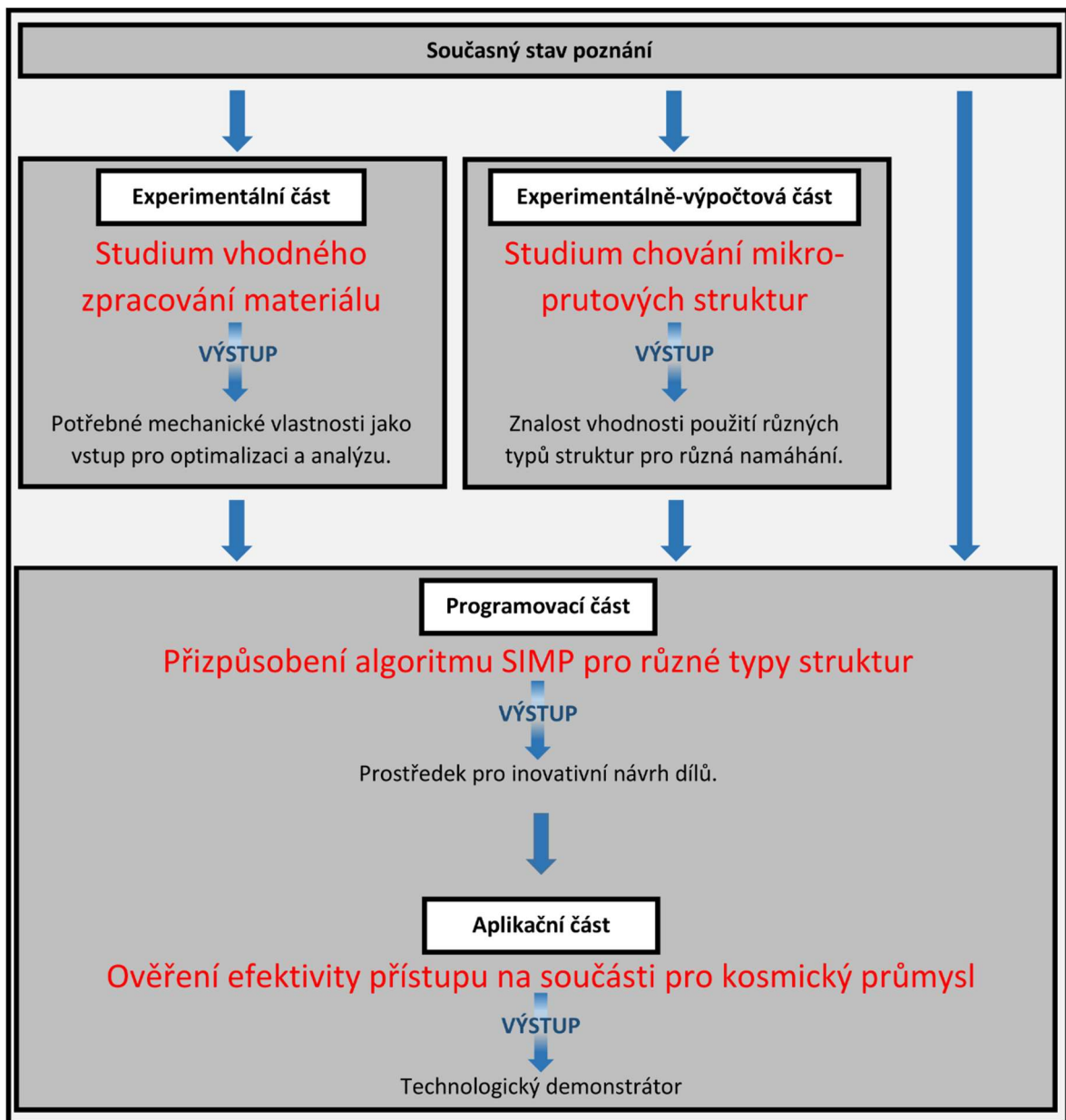
Odůvodnění hypotézy č. 3:

Pokud se potvrdí hypotéza 1, pak bude možné vybrat typ struktury tak, že při zachování stejné tuhosti, bude mít buňka menší relativní hustotu a tím pádem hmotnost. Aremu [31] ve svém srovnání uvádí, že PFCC struktura má schopnost přenést dvojnásobnou sílu v tlaku při konstantní relativní hustotě ve srovnání s BCC strukturou. Opačnou úvahou by mělo být možné pro stejné zatížení, jako unese BCC struktura, použít výrazně lehčí PFCC strukturu. Protože tuhost roste s relativní hustotou exponenciálně [27, 28], bylo by při použití PFCC struktury pro součást namáhanou pouze na tlak snížení hmotnosti přibližně o 30 %.

5.4 Návrh způsobu řešení

Disertační práce je koncipována jako aplikovaný výzkum a má 3 hlavní části, které reflektují dílčí cíle práce. Jejich návaznost je popsána v blokovém schématu na obrázku 5.1.

- 1) Studium chování mikro-prutových struktur (*experimentálně-výpočtová část*).
- 2) Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu (*experimentální část*).
- 3) Topologická optimalizace a algoritmus návrhu (*programovací a aplikační část*).



Obr. 5.1: Blokové schéma postupu řešení disertační práce.

5.4.1 Materiál, zařízení a software

Materiály použité v disertační práci budou omezeny na hliníkové slitiny určené pro aditivní technologie, konkrétně slitiny AlSi10Mg a AlSi7Mg0,6. Obě jsou velmi dobře zpracovatelné technologií SLM, není proto potřeba hledat pro ně procesní parametry. AlSi7Mg0,6 (A357 dle americké normy) má navíc certifikaci pro použití v leteckém průmyslu.

Aditivní výroba bude probíhat na zařízení pro technologii Selective Laser Melting SLM 280 HL. Tepelné zpracování vzorků a dílů bude prováděno v laboratorní žíhací peci LH 30/13 a digitalizace optickým skenerem ATOS Triplexscan. Mechanické testování bude prováděno po domluvě na zařízeních ve vlastnictví ÚMVI, ÚMTB nebo LÚ.

Software pro vývoj metodiky návrhu topologicky optimalizovaných součástí vyráběných aditivní technologií a následné porovnání bude SolidThinking Inspire a Optistruct od firmy

Altair Engineering. Pro MKP analýzy a studium chování jednotlivých struktur bude použito prostředí ANSYS Workbench. Pro MKP analýzy rozsáhlých mikro-prutových struktur bude použit software Simsolid od Altair Engineering. Pro implementaci různých typů struktur do algoritmu SIMP bude použit MATLAB. Výsledný postup bude s velkou pravděpodobností programován v jazyce Visual basic a implementován do softwaru Catia V5R20, kde se dá velice dobře propojit programování a CAD systém.

5.4.2 Postup

Studium chování mikro-prutových struktur

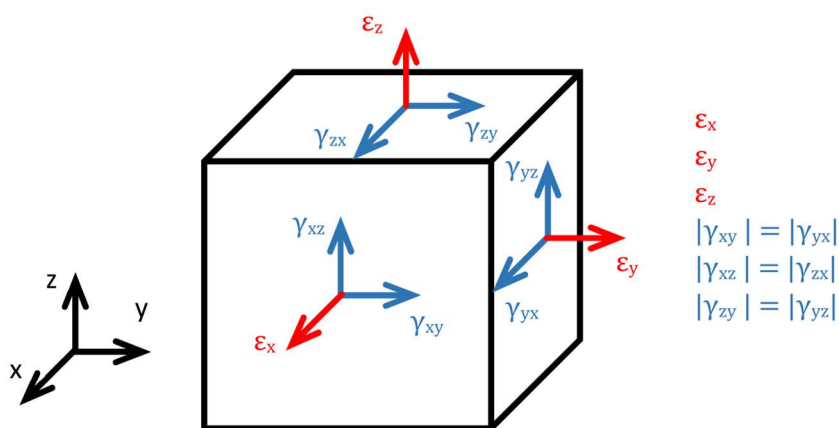
První část řešení disertační práce je zaměřena na teoretické studium chování struktur ať už pomocí analytických výpočtů, nebo pomocí metody konečných prvků, které bude následně porovnáno s fyzickými experimenty. Z porovnání s velkou pravděpodobností vyplynou korekční faktory pro numerické simulace. Výstupem této části bude znalost teoretické vhodnosti některých anizotropních typů buněk pro 6 základních druhů elementárního přetvoření a bude zodpovězena vědecká otázka číslo 1. K dokončení první části bude potřeba splnit následující kroky.

Definice mikro-prutových struktur vhodných pro aditivní výrobu.

Na základě literatury a interních zkušeností budou definovány mikro-prutové elementární buňky, které jsou samonosné a lze je vyrábět v dostatečné kvalitě bez podpůrných struktur. Buňky vzniknou jako varianty a kombinace prostorově a plošně středěných krychlových mřížek BCC a FCC protože je lze mezi sebou dobře kombinovat.

Studium chování mikro-prutových struktur při elementárním tlakovém, tahovém a smykovém zatížení ve všech třech směrech.

Obecně namáhaný díl nelze efektivně rozdělit na oblasti, které jsou zatíženy základními typy namáhání, jako je tah, tlak, ohyb a krut. Problémem je měřítko dělení. Celá součást může být například namáhána dominantně na ohyb. Při větším přiblížení se ukáže, že některé části jsou namáhány na tlak, některé na tah atd. Jediným rozumným dělením ve spojitosti s výpočty je metoda konečných prvků, kdy se dá zatížení jednotlivých prvků hodnotit na základě elementárních přetvoření (viz obrázek 5.2).



Obr. 5.2: Přetvoření na elementárním prvku.

Pokud se bude definovat velikost konečného prvku stejná jako je velikost mikro-prutové buňky, lze na základě elementárních přetvoření zjistit tuhost mikro-prutové buňky v jednotlivých směrech.

Důležitým předpokladem je práce s buňkou tvaru krychle. Poté se dá obecná anizotropie pro tento případ relaxovat pouze na ortotropii. Vznikne tak soubor 6 základních charakteristik pro každou buňku: 3 moduly pružnosti v tahu/tlaku a 3 moduly pružnosti ve smyku.

Klasifikace mikro-prutových struktur dle relativní hustoty a modulu pružnosti.

Důležitým krokem po získání všech charakteristik pro všechny definované typy buněk pro co největší rozsah relativních hustot bude jejich vzájemné porovnání vzhledem k relativní hustotě. Zároveň bude důležité porovnat data také ve vztahu k jejich modulům pružnosti. Výsledkem poté bude tabulka, kdy pro každou možnou kombinaci namáhání, bude pro danou relativní hustotu možné určit nejvýhodnější typ buňky, respektive minimální možnou relativní hustotu, která ještě zajistí požadované vlastnosti.

Aditivní výroba a experimentální ověření chování mikro-prutových struktur.

Po vyhodnocení celé definované knihovny struktur budou vyrobena zkušební tělesa pro tahovou a tlakovou zkoušku. Tělesa budou zatěžována ve všech počítaných směrech. Tuhost ve smyku bude testována pomocí speciálního přípravku na klasickém stroji pro tahovou zkoušku.

Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace.

Výsledky z experimentů (deformace a moduly pružnosti) budou porovnány s daty z numerických simulací. Výsledkem bude soubor korekčních parametrů, které budou upravovat materiálové charakteristiky mikro-prutových struktur tak, aby odpovídaly realitě.

Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu

Druhá část řešení disertační práce bude probíhat paralelně s tou první. Jejím smyslem bude prozkoumat možné způsoby post-procesingového zpracování se zvláštním zaměřením na tepelné zpracování, které je u většiny aditivně vyráběných dílů nutností. Výstupem bude znalost dosažitelných mechanických vlastností, které budou poté vstupovat do topologické optimalizace a následné pevnostní analýzy. Bude také zodpovězena vědecká otázka číslo 2. K dokončení druhé části bude potřeba splnit následující kroky.

Definice vhodných druhů tepelného zpracování hliníkových slitin.

Tepelná zpracování pro vybrané hliníkové slitiny AlSi10Mg a AlSi7Mg0,6 se budou dát rozdělit do dvou skupin. První bude technologické zpracování, které bude mít za cíl pouze snížení vnitřního napětí v materiálu. Druhou skupinou bude zpracování, které bude maximalizovat pevnostní charakteristiky materiálu. Protože obě slitiny jsou díky přítomnosti hořčíku precipitačně vytvrditelné, bude se druhá skupina zpracování skládat z rozpouštěcího žíhání následovaného zakalením ve vodě a umělým stárnutím. Slitina poté bude v tzv. T6 stavu.

Studium vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.

Budou vyráběny sady vzorků pro tahovou zkoušku, které budou mít různé tepelné zpracování. Vždy bude vyrobena i referenční sada, která bude pouze v as-built stavu. Z tahových zkoušek se bude vyhodnocovat modul pružnosti, mez kluzu, mez pevnosti a prodloužení.

Studium vlivu tepelného zpracování na zbytkové napětí.

Spolu s tahovými vzorky budou na stejných platformách stavěny vzorky pro zjišťování zbytkového vnitřního napětí. Díky tomu, že bude celá platforma zpracována najednou, bude možné spojit vliv na mechanické vlastnosti a zároveň na zbytková napětí, což prozatím v literatuře chybí. Zbytkové napětí se bude posuzovat z deformace vzorků po odřezání. Cílem je, aby po tepelném zpracování a odřezání od stavěcí podložky byly deformace minimální a neovlivňovaly geometrickou přesnost a funkcionalitu dílu.

Ověření poznatků na strukturách.

Série vzorků na konci druhé části ověří použitelnost materiálových charakteristik zjištěných z plného materiálu pro mikro-prutové struktury. Budou zopakovány reprezentativní testy z první části.

Topologická optimalizace a algoritmus návrhu

Na začátku třetí části řešení disertační práce bude potřeba navrhnout metodiku pro návrh součástí optimalizovaných jak topologicky, tak technologicky pro aditivní výrobu. Metodika bude ověřována a zdokonalována po celou dobu studia. Smyslem je získání praktického know-how pro navrhování dílů plně využívajících možnosti aditivních technologií. Díky tomu bude možné na konci výsledky disertační práce ve formě optimalizovaného dílu porovnat se skutečně kvalitním dílem optimalizovaným klasickou cestou.

V programovací části vznikne část kódu, která bude implementována do normálního SIMP algoritmu pro topologickou optimalizaci, která bude mít za úkol doplňovat dle kritérií jednotlivé typy mikro-prutových buněk.

Na konci budou vyrobeny optimalizované součásti a experimentálně porovnány. Tím bude známa odpověď na vědeckou otázku číslo 3 a bude ověřena efektivita tohoto přístupu.

Vypracování a ověření metodiky pro kvalitní návrh objemově topologicky optimalizovaných součástí pro aditivní výrobu.

Metodika bude vycházet z postupu navrženého v diplomové práci, která bude s velkou pravděpodobností založena na využití komerčních softwarů pro topologickou optimalizaci od Altair Engineering nebo ANSYS. Po provedení topologické optimalizace bude zvolena orientace při stavbě a ve fázi vytváření výrobních CAD dat budou aplikována pravidla pro navrhování dílů pro aditivní technologie. Metodika bude ověřována na různých dílech v rámci podpůrných bakalářských prací a aplikačních projektů.

Implementace algoritmu do SIMP metody.

V prostředí MATLAB je k dispozici kód pro optimalizační metodu SIMP jak ve 2D tak ve 3D. Bude upraven tak, aby vznikly elementy s relativní hustotou mezi 0 a 1. Poté bude na základě matice posunů jednotlivých uzlů vytvořena matice přetvoření pro každý jednotlivý element, na jejímž základě bude rozhodnuto o přiřazení nejvhodnější struktury.

Výstupem bude textový soubor, který bude jednotlivým prvkům sítě přiřazovat dané struktury. Vznik geometrie už bude zabezpečen CAD softwarem.

Návrh skriptu pro přiřazování jednotlivých typů struktur do komponenty.

Bude navržen skript, který dokáže na základě vstupů z MATLABu vybrat a přiřadit na dané místo, respektive do daného konečného prvku správnou buňku z knihovny. Jako nejlepší kandidát pro modelovací software se v současné době jeví program Catia, který se dá velice jednoduše řídit makry psanými v jazyce Visual Basic.

V této fázi vzniknou první modelová tělesa, která budou kombinovat několik druhů mikro-prutových struktur a budou experimentálně testována.

Návrh ověřovací komponenty klasickým a inovativním způsobem.

V konečné fázi disertační práce bude navržena komponenta pro kosmický nebo letecký průmysl s využitím více druhů mikro-prutových struktur. Zároveň bude komponenta navržena také odzkoušenou metodikou pro návrh topologicky optimalizovaných dílů. Již z dřívějších prací by měla komponenta existovat ve formě optimalizace s využitím pouze BCC struktur.

Všechny tři komponenty budou otestovány a porovnány.

5.4.3 Plán publikací

V řešení disertační práce jsou plánovány články do impaktovaných časopisů a podpůrné články prezentované na konferencích.

První impaktovaný článek se bude zabývat metodikou pro návrh dílů. Jeho obsah bude úzce souviset s diplomovou prací. Další článek se představí studium chování mikro-prutových struktur a jejich teoretické a experimentální porovnání. Třetí plánovaný článek bude prezentovat navržený postupem optimalizace, úpravu SIMP algoritmu včetně vzniku geometrie a prvních modelových těles. Poslední článek se bude porovnávat efektivitu nově navržené strukturované optimalizace a klasických postupů.

Na konferencích a v recenzovaných časopisech jsou plánovány články zaměřené na tepelné zpracování případně méně významné problematiky týkající se mikro-prutových struktur nebo krátké prezentace optimalizovaných dílů.

Časopisy plánované k publikaci:

Structural and Multidisciplinary Optimization (IF: 3,925)

3D Printing and Additive Manufacturing (IF: 3,259)

Optimization and Engineering (IF: 1,824)

Finite Elements in Analysis and Design (IF: 2,456)

Rapid Prototyping Journal (IF: 2,801)

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

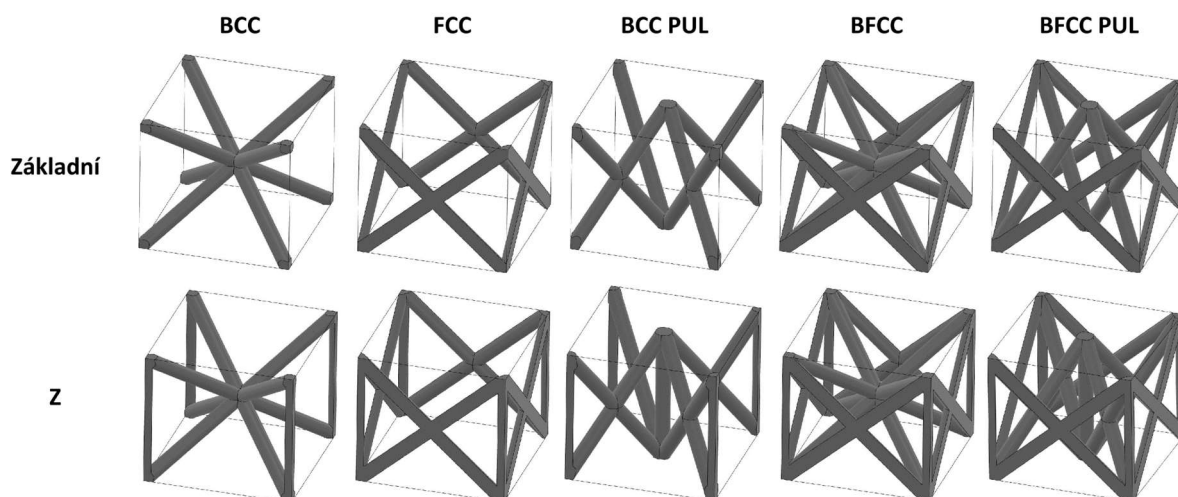
Disertační práce je v současné době rozpracovaná ve všech třech podoblastech. Základem je zjištění dosažitelných mechanických vlastností, které vystupují ve všech ostatních částech disertační práce. Proto je řešení této oblasti v nejpokročilejší fázi. Druhou oblastí, které je nutno se dlouhodobě věnovat je ověření metodiky pro návrh topologicky optimalizovaných součástí, kterou bylo v současné době navrženo několik dílů.

6.1 Studium chování mikro-prutových struktur

Studium mikro-prutových struktur je prozatím v teoretické fázi, kdy se numericky zkoumá chování jednotlivých typů mikro-prutových struktur v celém intervalu relativních hustot 0,05 – 0,95 a je vytvořena předběžná výběrová tabulka jako vstup do optimalizačního skriptu.

6.1.1 Definice mikro-prutových struktur vhodných pro aditivní výrobu

Byla definována knihovna deseti druhů mikro-prutových struktur (viz obrázek 6.1). Všechny jsou založeny na prostorově a plošně středěných krychlových mřížkách BCC a FCC. Základní BCC a FCC buňky jsou doplněny jejich kombinací (BFCC), zkrácením jedné přepony pro tělesovou úhlopříčku (BCC PUL) a kombinací BCC PUL a FCC (BFCC PUL). Všechny tyto typy jsou definovány i ve variantě s vyztužujícími pruty ve směru osy Z.

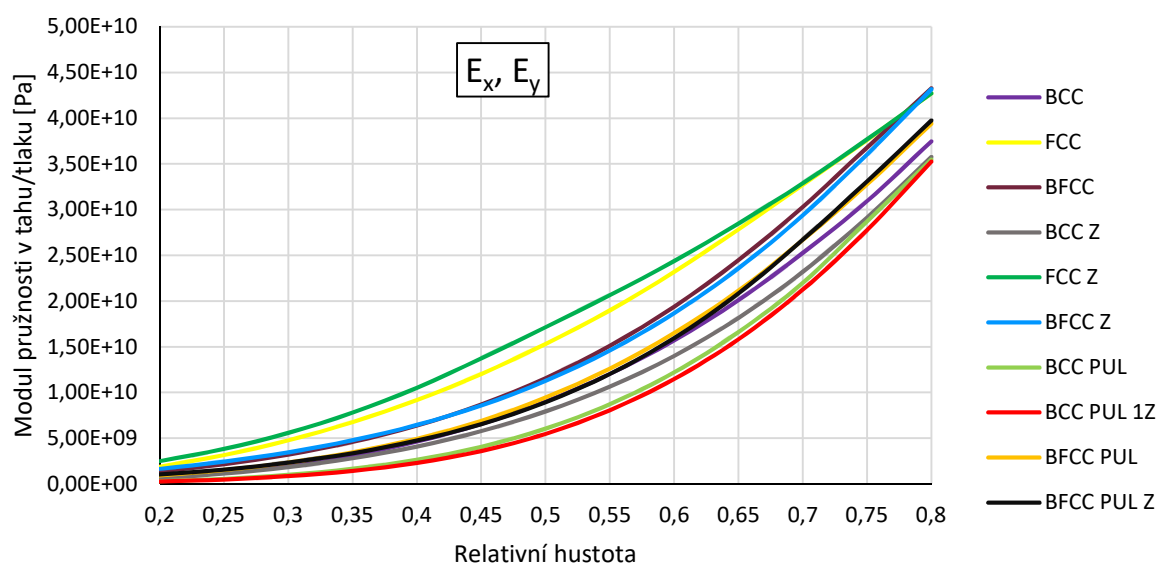


Obr. 6.1: Základní knihovna buněk použitá pro výzkum.

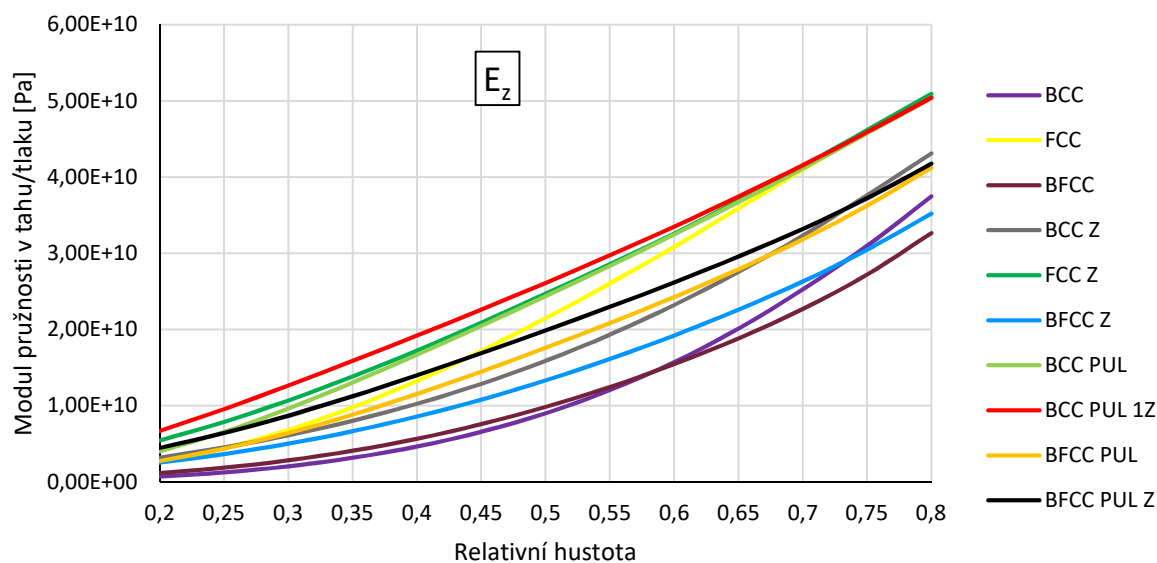
6.1.2 Studium chování mikro-prutových struktur při elementárním tlakovém, tahovém a smykovém zatížení

Pro numerické studium bylo využito programu ANSYS Workbench s modulem Material designer. Ten dovoluje definici vlastních topologií mikro-prutových struktur. Po definici všech vstupů je mikro-prutová struktura zatížena v požadovaných směrech a výsledkem jsou základní materiálové charakteristiky – moduly pružnosti v tahu/tlaku a moduly pružnosti ve smyku pro všechny tři směry při předpokládané ortotropii. Geometrie struktur je definována v závislosti na nastavené relativní hustotě. Při výpočtu software nepočítá pouze jednu buňku, ale předpokládá uniformní pole těchto struktur.

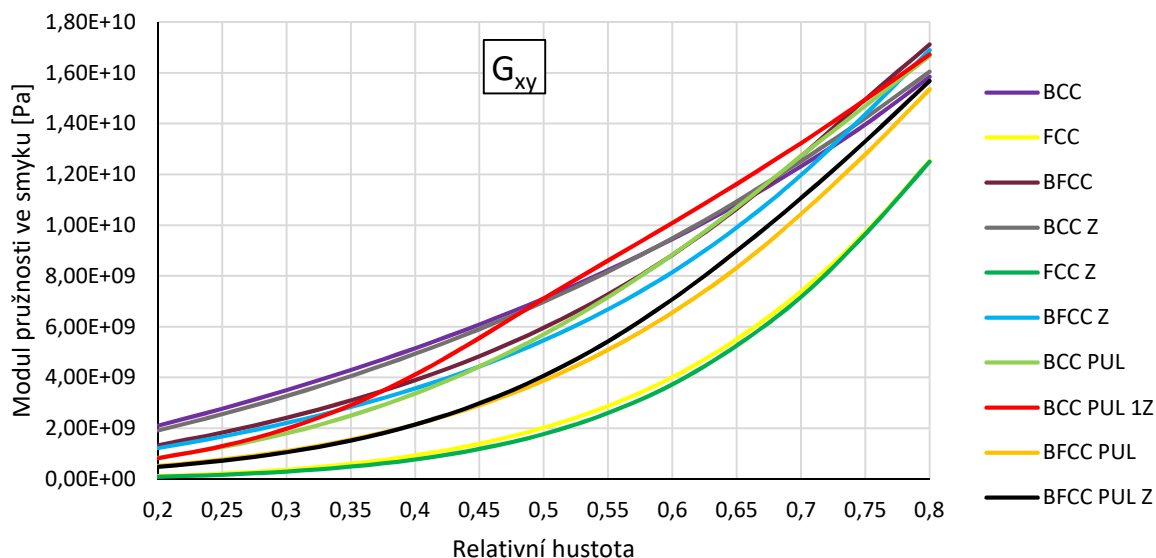
Na obrázcích 6.2 až 6.5 jsou grafy závislosti jednotlivých modulů pružnosti na relativní hustotě v rozsahu 0,2-0,8.



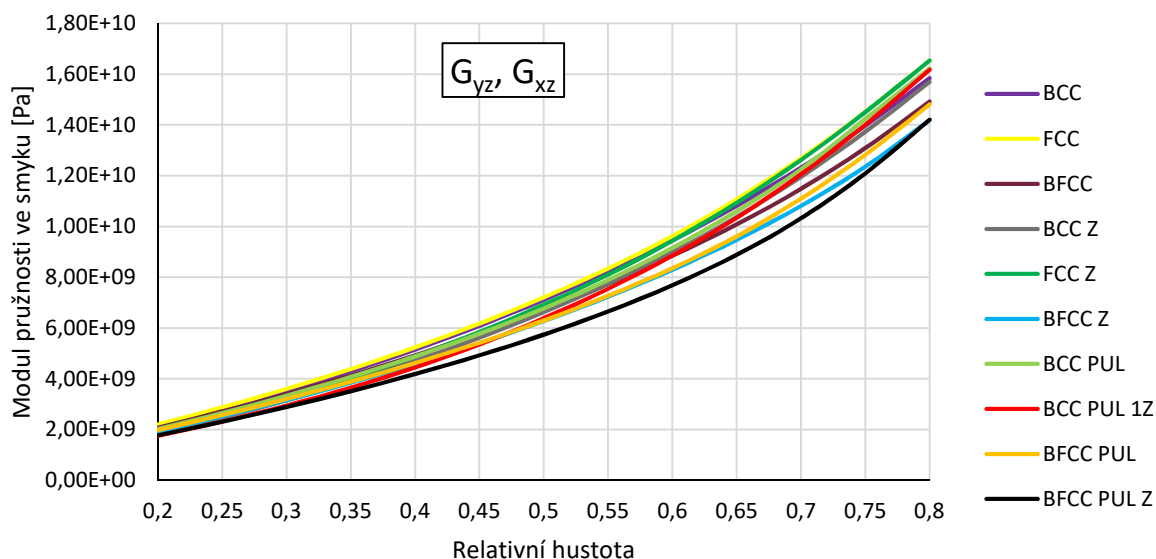
Obr. 6.2: Modul pružnosti v tahu/tlaku v ose x a y v závislosti na relativní hustotě.



Obr. 6.3: Modul pružnosti v tahu/tlaku v ose z v závislosti na relativní hustotě.



Obr. 6.4: Modul pružnosti ve smyku v rovině xy v závislosti na relativní hustotě.



Obr. 6.5: Modul pružnosti ve smyku v rovině xz a yz v závislosti na relativní hustotě.

Poznatky z prvotního srovnání ukazují, že pro různé hodnoty relativní hustoty jsou nejlepší vlastnosti u různých typů buněk. Nejlépe to jde vidět u modulu pružnosti ve smyku v rovině XY (obrázek 6.4). Tam je od 0,2 po 0,5 nejtěžší buňka BCC. Od 0,5 po 0,75 ji předčí BCC PUL Z a pro relativní hustotu 0,8 je nejlepší geometrie BFCC.

Na základě těchto vstupních dat byly vytvořeny porovnávací tabulky pro každou charakteristiku. Jejich cílem bylo určit potřebnou relativní hustotu jednotlivých druhů struktur tak, aby měly požadovanou hodnotu modulu pružnosti. Ta byla určena na základě předpisu *Power Law*, který je určen pro aproximaci materiálu v rámci topologické optimalizace metodou SIMP. Pro představu je jedna tabulka ukázána na obrázku 6.6.

VOLUME FRACTION	POWER LAW	SOLID	BCC	FCC	BFCC	BCC Z	FCC Z	BFCC Z	BCC PUL	BCC PUL Z	BFCC PUL	BFCC PUL Z
0,3	0,027	1,85E+09	0,29	0,20	0,23	0,30	0,17	0,21	0,36	0,37	0,27	0,27
0,35	0,042875	2,94E+09	0,34	0,24	0,29	0,35	0,22	0,27	0,41	0,42	0,33	0,33
0,4	0,064	4,38E+09	0,39	0,29	0,34	0,41	0,27	0,33	0,46	0,46	0,38	0,39
0,45	0,091125	6,24E+09	0,44	0,34	0,39	0,46	0,32	0,39	0,50	0,51	0,43	0,44
0,5	0,125	8,56E+09	0,49	0,39	0,45	0,51	0,36	0,45	0,55	0,55	0,48	0,49
0,55	0,166375	1,14E+10	0,54	0,44	0,50	0,56	0,42	0,50	0,59	0,59	0,53	0,54
0,6	0,216	1,48E+10	0,59	0,49	0,55	0,61	0,47	0,55	0,63	0,63	0,58	0,59
0,65	0,274625	1,88E+10	0,64	0,55	0,59	0,66	0,52	0,60	0,67	0,67	0,63	0,63
0,7	0,343	2,35E+10	0,68	0,60	0,64	0,70	0,59	0,65	0,71	0,72	0,67	0,67
0,75	0,421875	2,89E+10	0,73	0,66	0,69	0,75	0,66	0,70	0,75	0,76	0,72	0,72
0,8	0,512	3,51E+10	0,78	0,72	0,74	0,80	0,72	0,74	0,80	0,80	0,77	0,77
0,85	0,614125	4,21E+10	0,83	0,79	0,79	0,84	0,79	0,79	0,84	0,84	0,82	0,82
0,9	0,729	4,99E+10	0,88	0,87	0,86	0,89	0,87	0,85	0,89	0,89	0,88	0,88
0,95	0,857375	5,87E+10	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94
1	1	6,85E+10										

Obr. 6.6: Porovnávací tabulka pro modul pružnosti v tahu/tlaku v rovině xy. Barevně jsou označeny relativní hustoty odpovídající modulu pružnosti ze sloupce „SOLID“

V dalším kroku byly vybrány nejlehčí struktury pro jednotlivé případy a posléze seřazeny do výběrové tabulky, která bude sloužit jako podklad pro vytváření CAD geometrie. V tabulce jsou zastoupeny relativní hustoty mezi 0,3 a 1. Z praktických důvodů se hustoty menší než 0,3 považují za 0. Jsou také uvažovány všechny možné kombinace elementárních namáhání, kterých je 15. Celá tabulka je rozsáhlá, proto je na obrázku 6.7 zobrazen pouze výřez.

	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx	Ex	Ez	Gxy	Gzx				
	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
0,3	0,21	BFCCZ	0,21	BFCCZ	0,1	FCCZ	0,1	FCCZ	0,14	BCCZ	0,14	BCCZ	0,14	BCCZ	0,07	FCC	0,08	BCC																		
0,35	0,27	BFCCZ	0,27	BFCCZ	0,13	FCCZ	0,13	FCCZ	0,19	BCCZ	0,19	BCCZ	0,19	BCCZ	0,11	FCC	0,12	BCC																		
0,4	0,33	BFCCZ	0,33	BFCCZ	0,17	FCCZ	0,18	FCCZ	0,24	BCCZ	0,24	BCCZ	0,24	BCCZ	0,16	FCC	0,17	BCC																		
0,45	0,39	BFCCZ	0,39	BFCCZ	0,22	BCCPULZ	0,23	FCCZ	0,3	BCCZ	0,3	BCCZ	0,3	BCCZ	0,21	FCC	0,22	BCC																		
0,5	0,45	BFCC	0,45	BFCC	0,26	BCCPULZ	0,3	BCCPUL	0,36	BCCZ	0,36	BCCZ	0,36	BCCZ	0,28	FCC	0,29	BCC																		
0,55	0,5	BFCC	0,5	BFCC	0,3	BCCPULZ	0,37	BCCPUL	0,42	BCCZ	0,42	BCCZ	0,42	BCCZ	0,35	FCC	0,36	BCC																		
0,6	0,55	BFCC	0,55	BFCC	0,36	BCCPULZ	0,42	FCC	0,48	BCCPULZ	0,48	BCCPULZ	0,48	BCCPULZ	0,42	FCC	0,43	BCC																		
0,65	0,59	BFCC	0,59	BFCC	0,42	BCCPULZ	0,5	FCC	0,53	BCCPULZ	0,53	BCCPULZ	0,53	BCCPULZ	0,5	FCC	0,51	BCC																		
0,7	0,64	BFCC	0,64	BFCC	0,48	BCCPULZ	0,58	FCC	0,59	BCCPULZ	0,59	BCCPULZ	0,59	BCCPULZ	0,6	FCC	0,58	BCC																		
0,75	0,69	BFCC	0,69	BFCC	0,55	BCCPULZ	0,65	FCC	0,65	BCCPULZ	0,65	BCCPULZ	0,65	BCCPULZ	0,67	FCC	0,65	BCCPULZ																		
0,8	0,74	BFCC	0,76	BFCC	0,63	BCCPULZ	0,72	FCC	0,72	BCCPULZ	0,72	BCCPULZ	0,72	BCCPULZ	0,73	FCC	0,72	BCCPULZ																		
0,85	0,79	BFCC	0,83	BFCC	0,71	FCCZ	0,79	FCC	0,79	BCCPULZ	0,8	BCCPUL	0,8	BCCPUL	0,79	FCCZ	0,78	BFCC																		
0,9	0,85	BFCCZ	0,88	BCC	0,79	FCCZ	0,86	FCC	0,86	BCCPULZ	0,86	BCCPUL	0,86	BCCPUL	0,86	FCCZ	0,85	BFCCZ																		
0,95	0,93	BFCCZ	0,94	BCC	0,89	FCCZ	0,93	BCCPULZ	0,94	BFCCPUL	0,94	BCCPUL	0,94	BCCPUL	0,93	FCCZ	0,93	BFCCZ																		

Obr. 6.7: Výřez výběrové tabulky pro rozsah hustot 0,3 – 1 a možné kombinace elementárních namáhání. Každé výpočtové hustotě (první sloupec) náleží určitý typ struktury a její relativní hustota.

V tabulce jsou zastoupeny všechny uvažované typy struktur. Nejčastější je typ FCCZ, poté BFCCZ a BCC. Rozdíl mezi uvažovanou relativní hustotou (první sloupec v tabulce na obrázku 6.7) a reálně použitelnou hustotou se pohybuje od 1 % do 25 %. V průměru je to 11 %, pro nejpoužívanější hustoty ze středu intervalu je to 15 %. Lze tedy očekávat, že díky použití více druhů mikro-prutových struktur v rámci jednoho dílu lze snížit jeho hmotnost o více jak 10 %, ve speciálních případech až o 20 %.

Tato zjištění potvrzují pracovní hypotézu číslo 1 a naznačují správnost hypotézy číslo 3.

6.2 Studium mechanických vlastností aditivně vyrobeného materiálu

Byly provedeny dvě studie na vliv tepelného zpracování na aditivně vyrobené hliníkové slitiny. Pilotní výzkum se týkal slitiny AlSi10Mg, při kterém byl navržen postup pro vyhodnocování jak mechanických vlastností, tak zároveň účinků na zbytkové vnitřní napětí. V další studii zaměřené na slitinu AlSi7Mg0,6 byly tyto poznatky použity a rozšířeny o studium vlivu jednotlivých parametrů na zpracování T6.

Také byla započata poslední fáze, kdy je tepelné zpracování zkušeno na mikro-prutové struktuře, ale pro zatím byly zkoumány pouze dynamické vlastnosti při absorpci energie, které zatím potvrzují vliv tepelného zpracování na chování materiálu.

6.2.1 Definice vhodných druhů tepelného zpracování hliníkových slitin.

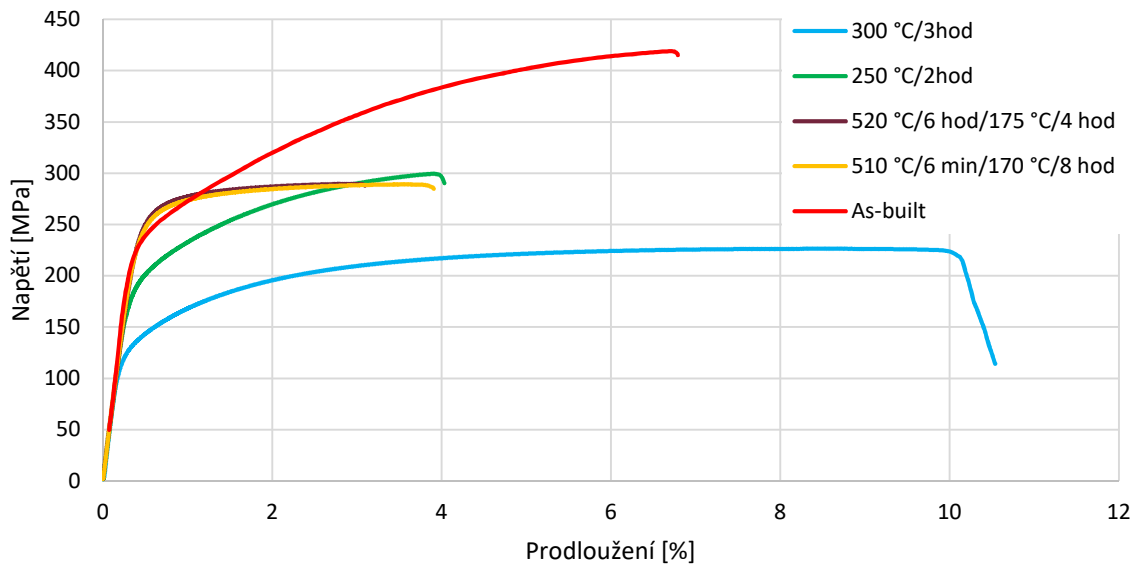
Pro první výzkum na AlSi10Mg byly na základě literatury a interní praxe definovány nejprve dvě tepelné zpracování pro snížení vnitřního napětí a dvě pro zvýšení pevnostních charakteristik. První bylo na 300 °C na 3 hodiny a druhé na 250 °C na 2 hodiny. První zpracování pro T6 stav bylo na 520 °C na 6 hodin, zakalení ve vodě a poté 175 °C na 4 hodiny. Druhé bylo na 510 °C na 6 minut, zakalení ve vodě a poté 170 °C na 8 hodin.

Na základě zkušeností z prvního výzkumu a faktu, že byl vyzkoušen široký rozsah parametrů pro T6 zpracování bylo rozhodnuto o podrobnějším výzkumu těchto parametrů. Pro snížení vnitřního napětí bylo upraveno tepelné zpracování na 330 °C na 1,5 hodiny. Pro T6 byly zafixovány parametry pro rozpouštěcí žíhání na 535 °C na 1 hodinu se zakalením ve vodě. Parametry pro T6 byly voleny v rozsahu 150 – 200 °C a 2 – 6 hodin. Jako perspektivní tepelné zpracování bylo zvoleno navíc pouze umělé stárnutí na 175 °C na 4 hodiny.

6.2.2 Studium vlivu tepelného zpracování na mechanické vlastnosti.

Bylo pozorováno několik trendů v mechanických vlastnostech. Žíhání ke snížení vnitřního napětí způsobuje výrazný pokles v pevnostních charakteristikách oproti as-built stavu. U AlSi10Mg byl pozorován propad u 300 °C na 3 hodiny až o 40 %. Zároveň se ale zvýšila průměrná tažnost oproti as-built stavu skoro dvojnásobně.

Zajímavý výsledek ukazuje srovnání dvou variant T6 pro AlSi10Mg. Ačkoliv se parametry výrazně lišily, byl vliv na mechanické vlastnosti prakticky stejný. Lehce se zvýšila mez kluzu, snížila se mez pevnosti a tažnost se snížila. Materiál se tak stal křehčím. Lze předpokládat, že délka rozpouštěcího žíhání nehraje u aditivně vyrobených dílů tak zásadně pozitivní roli jako u odlitků, kvůli jemnější mikrostruktuře, která se nepotřebuje homogenizovat. Porovnání tahových křivek pro tento výzkum je na obrázku 6.8.



Obr. 6.8: Vybrané tahové diagramy pro tepelné zpracování AlSi10Mg.

Výsledkem tohoto výzkumu bylo doporučení pro zpracování slitiny AlSi10Mg, které kombinovalo obě procedury T6 do neekonomičtějšího zpracování, tj. nejkratší výdrže.

Výzkum u AlSi7Mg0,6 se zaměřil hlavně na zkoumání parametrů T6 zpracování. Z celkem pěti T6 zpracování vyšlo jako nejlepší rozpouštěcí žihání na 535 °C na 1 hodinu následované zakalením ve vodě a umělým stárnutím na 200 °C na 2 hodiny. Při něm bylo dosaženo zvýšení meze kluzu oproti as-built stavu z 218 MPa na 240 MPa a lehké snížení meze pevnosti z 300 MPa na 280 MPa. Tažnost se zachovala na 2,5 %.

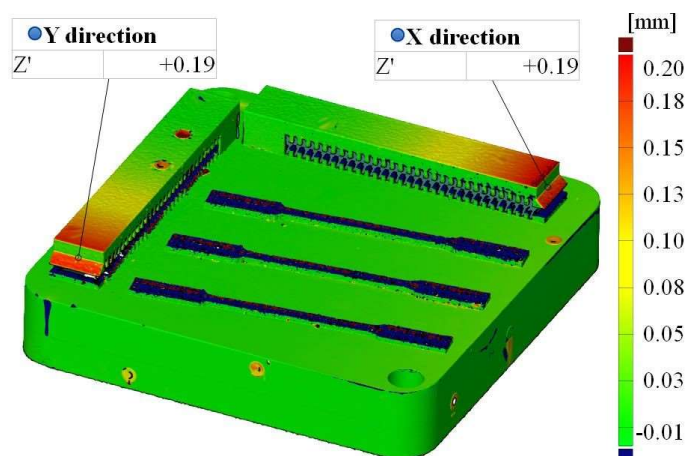
Nejlepších pevnostních charakteristik ovšem dosáhlo díky dominantnímu precipitačnímu vytvrzení samotné umělé stárnutí, kdy byla výsledná mez kluzu 280 MPa a mez pevnosti až 330 MPa. Tažnost ovšem byla nejmenší z celého zkoumaného souboru.

Podrobné výsledky lze najít v příslušných publikacích..

6.2.3 Studium vlivu tepelného zpracování na zbytkové napětí.

Pro studium vlivu na zbytkové napětí uvnitř dílu byly na všechny vyráběné zkušební platformy přidány trámové vzorky. Pro jejich vyhodnocení byl navrhnut postup, který je založený na contour metodě a principu superpozice. Myšlenka spočívá v navrácení deformovaného povrchu do původního stavu, čímž je do něj vnesena stejná napjatost, která zde byla na začátku a způsobila prvotní deformaci. V praxi postup obnášel naskenování vzorků, jejich přeřiznutí, novou digitalizaci deformované geometrie, její převedení na CAD těleso a následné posunutí deformovaného povrchu do původní polohy v MKP řešiči.

Výsledkem bylo maximální napětí, které se indukuje vždy v horní vrstvě. Ukázka vyhodnocení celkových deformací je na obrázku 6.9.



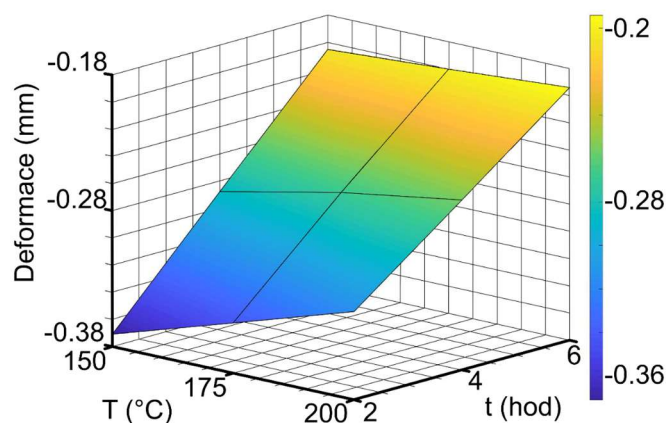
Obr. 6.9: Vyhodnocení celkových deformací na naskenované geometrii trámových vzorků.

Výsledky výzkumu ukazují, že jakékoliv tepelné zpracování sníží zbytkové napětí. Otázkou je pouze, jestli je to dostatečná redukce. V as-built stavu se deformace pro tyto slitiny pohybují mezi 1,5 a 2 mm.

Pokud je použito žíhání pro snížení vnitřního napětí, je výsledná deformace 0,1 až 0,2 mm. Tento výhodný efekt je ale za cenu výše zmíněného výrazného snížení pevnostních charakteristik. Pokud bylo použito pouze umělé stárnutí, tak byl vliv na zbytkové napětí malý a snížení bylo pouze o přibližně 50 %

V případě všech tepelných zpracování, které obsahovaly kalení ve vodě, došlo k nahrazení původních tahových napětí, které se u dílů vyskytují, napětími tlakovými. Ty jsou pro díly výhodné hlavně z hlediska únavové životnosti, kdy napětí v povrchové vrstvě působí proti otevírání únavové trhliny. V absolutních hodnotách jsou deformace vzorků srovnatelné s účinkem žíhání ke snížení vnitřního napětí.

Studium parametrů T6 zpracování ukázalo, že na snížení vnitřního napětí je potřeba dostatečně vysoká teplota a dostatečná doba. Jak lze vidět na obrázku 6.10, tak redukce napětí je daleko menší při 150 °C než při 200 °C při stejné výdrž.



Obr. 6.10: Závislost deformace způsobené vnitřním napětím na teplotě a výdrž umělého stárnutí.

6.3 Topologická optimalizace a algoritmus návrhu

Tato fáze řešení disertační práce je zatím ve své programovací části a v ověřování konceptů, na jakých by měl fungovat skript pro vytváření geometrie. Metodika pro návrh optimalizovaných součástí pro aditivní technologie je v procesu svého ověřování na různých dílech.

6.3.1 Vypracování a ověření metodiky pro kvalitní návrh objemově topologicky optimalizovaných součástí pro aditivní výrobu.

Všechny poznatky a výsledky z diplomové práce byly sepsány a publikovány v prestižním časopise Rapid Prototyping Journal. Publikovaná metodika není v ničem průlomově nová, ale je uceleným návodem pro tvorbu kvalitních dílů.

Velkým ověřovacím testem byl návrh těhlice pro závodní vůz poháněný stlačeným vzduchem. Tento komplexně zatěžovaný díl byl s využitím publikovaného postupu navrhnout přímo pro aditivní technologie. Díky účinné optimalizaci bylo dosaženo snížení hmotnosti původních dílů o 53 % a zároveň byly splněny všechny pevnostní a bezpečnostní podmínky. Výsledný díl je na obrázku 6.11.



Obr. 6.11: Topologicky optimalizovaná levá přední těhlice pro závodní vůz.

Další menší díly vznikaly v rámci výukových projektů. Optimalizace výhradně pro aditivní technologie byla také aplikována na funkční díly pro Honeywell International, nebo momentálně pro Bosch Rexroth. Ani jeden z dílů zde není možné zveřejnit.

6.3.2 Implementace vyhodnocovacího algoritmu do SIMP metody

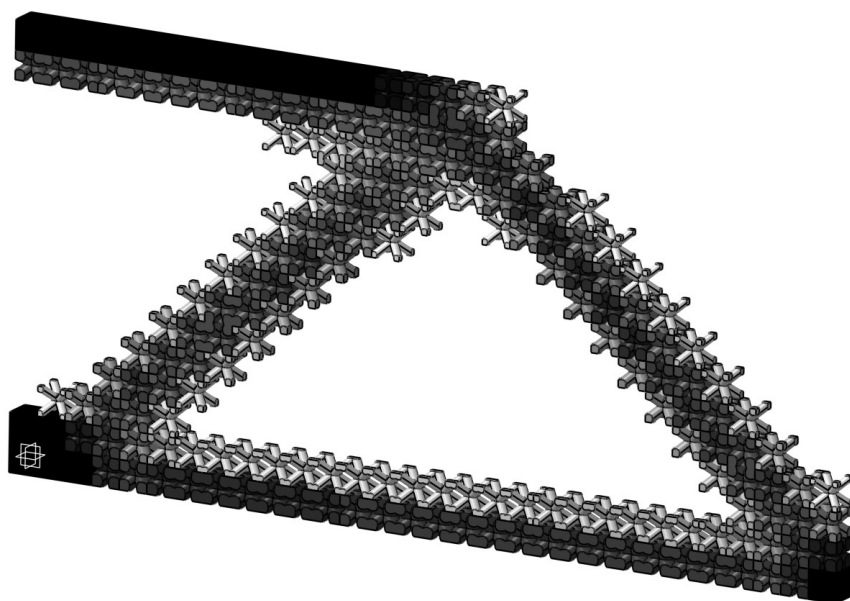
Pro tvorbu optimalizačního algoritmu byl využit skript publikovaný Sigmundem (pro 2D) [43] a skript publikovaný Liem (pro 3D) [44].

K oběma skriptům bylo připojeno rozřazení navrhovaných hustot v intervalu 0,3 – 1 s krokem 0,05, výpočet přetvoření pro každý element na základě matice posunutí a rozhodovací cyklus pro vyhodnocení převažujícího způsobu namáhání v jednotlivých

elementech. Výstupem jsou momentálně dvě matice. První je matice relativních hustot pro všechny elementy a druhá je matice způsobu namáhání. To jsou požadované informace, které jsou nutné pro výběr správné struktury.

6.3.3 Návrh skriptu pro přiřazování jednotlivých typů struktur do komponenty

Tato aktivita je zatím ve fázi manuálního ověřování principů, na základě kterých by mohla být tvořena finální geometrie. Jedna z úloh, na které byla použita pouze jedna základní buňka BCC, je na obrázku 6.12. Různé relativní hustoty jsou znázorněny různým odstínem šedi.



Obr. 6.12: Jednoduchá optimalizovaná geometrie tvořená BCC strukturou o různé relativní hustotě.

6.4 Vzniklé publikace

Doposud vzniklo 6 publikací, které se věnovaly tématu disertační práce nebo mohou být využity v jejím řešení. U 4 je autor na prvním místě a u 2 je druhý v pořadí.

Vaverka, et al.,2019 - *Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by Selective Laser Melting* [45]

Metodika pro návrh topologicky optimalizovaných součástí pro aditivní výrobu byla sepsána a podána k publikaci ve speciálním čísle „Topology optimisation in additive manufacturing“ impaktovaného časopisu Rapid Prototyping Journal (IF 2019 dle WOS 3,099 – Q2).

Vaverka, et al., 2018 - *Effect of heat treatment on mechanical properties and residual stresses in additively manufactured parts* [46]

Výzkum týkající se tepelného zpracování slitiny AlSi10Mg byl prezentován na konferenci Engineering Mechanics 2018 a je indexován v databázi Web of Science.

Vaverka, et al., 2019 - *Effect of heat treatment on mechanical properties of AlSi7Mg0.6 aluminium alloy processed bySLM* [47]

Výzkum týkající se tepelného zpracování slitiny AlSi7Mg0,6 byl prezentován na konferenci EUROPM 2019, která proběhla v říjnu a sborník by měl být indexována v databázi Scopus.

Vrána, et al., 2019 - *Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption* [48]

Poznatky o vlivu tepelného zpracování na objemový materiál byly ověřeny na mikro-prutových strukturách a byly prezentovány na konferenci EUROPM 2019.

Vrána, et al., 2020 - *Shape and dimensional analysis of lattice structures produced by selective laser melting* [49]

Metodika pro zjišťování skutečných rozměrů mikro-prutových struktur byla publikována v recenzovaném časopise MM Science a je indexována v databázi Scopus.

Vaverka, 2019 - *Ultra lehké komponenty vyráběné kovovým 3D tiskem* [50]

Obecná problematika používání mikro-prutových struktur při optimalizaci a návrhu dílů byla sepsána formou populárně naučného článku a byla publikována v časopise MM Průmyslové spektrum v čísle 4/2019.

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce přibližuje téma disertační práce a současný stav jejího řešení. V prvních kapitolách je rozvedena teorie topologické optimalizace, jejíž částí se bude disertační práce zabývat. Konkrétní zaměření je poté představeno v přehledu současného stavu poznání, který se soustřeďuje na problematiku strukturovaných materiálů, jejich použití v topologické optimalizaci, chování a použitelné mechanické vlastnosti pro jejich simulaci. Analýzou současného stavu bylo zjištěno, že se sice mikro-prutové buňky v topologické optimalizaci používají, ale ve velice omezené míře a vůbec není využit jejich plný potenciál. Většinou je to jeden typ buňky, zpravidla BCC, u které se mění průměr jednotlivých prutů dle zatížení. Nikdy se ale nemění topologie buňky.

Z tohoto poznání jasně vyplynula oblast, na kterou bude práce zacílena. Je jí možnost využití více druhů mikro-prutových buněk v rámci jednoho dílu a díky tomu dle zatížení neměnit pouze průměr prutů, ale celou topologii buňky. Díky tomu by mělo být možné získat díl, který je lehčí ale při tom stejně tuhý jako díl, u kterého je použit pouze jeden typ mikro-prutové struktury. Pro splnění globálního cíle byly definovány tři cíle dílčí, které odpovídají jednotlivým vědeckým otázkám a oblastem zaměření práce. Prvním okruhem je definování používaných mikro-prutových buněk, studium jejich anizotropie a vzájemné porovnání. Druhým směrem výzkumu je studium tepelného zpracování, které by přineslo optimální kombinaci mechanických vlastností. A poslední oblastí je návrh postupu, kterým by se takováto vylepšená topologická optimalizace realizovala a jestli má jeho použití nějaké relevantní praktické dopady.

Detailní popis plánovaných aktivit a míra jejich splnění je popsána v posledních kapitolách pojednání. Vyplyvá z nich, že disertační práce je rozpracovaná ve všech třech oblastech výzkumu, přičemž jedna, nalezení vhodného tepelného zpracování, je již skoro u konce a publikovaná.

8 LITERATURA

- [1] MICHELL, A. G. M. The limits of economy of material in frame-structures. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [online]. 1904, **8**(47), 589–597. ISSN 1941-5982. Dostupné z: doi:10.1080/14786440409463229
- [2] LEWIŃSKI, Tomasz, M. ZHOU a G. I. N. ROZVANY. Extended exact least-weight truss layouts-Part II: Unsymmetric cantilevers. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 1994, **36**(5), 399–419. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/0020-7403(94)90044-2
- [3] SIGMUND, O. Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials. *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON SERIES A-MATHEMATICAL PHYSICAL AND ENGINEERING SCIENCES* [online]. 2000, **358**(1765), 211–227. ISSN 1364-503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2000.0528
- [4] BENDSØE, M. P. a N. KIKUCHI. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1988, **71**(2), 197–224. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/0045-7825(88)90086-2
- [5] SIGMUND, O. a K. MAUTE. Topology optimization approaches: A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2013, **48**(6), 1031–1055. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-013-0978-6
- [6] ESCHENAUER, H. A., V. V. KOBELEV a A. SCHUMACHER. Bubble method for topology and shape optimization of structures. *Structural Optimization* [online]. 1994, **8**(1), 42–51. ISSN 09344373. Dostupné z: doi:10.1007/BF01742933
- [7] ZHOU, M. a G. I N ROZVANY. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1991, **89**(1–3), 309–336. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/0045-7825(91)90046-9
- [8] RODRIGUES, H., J. M. GUEDES a M. P. BENDSOE. Hierarchical optimization of material and structure. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2002, **24**(1), 1–10. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-002-0209-z
- [9] COELHO, P. G., P. R. FERNANDES, J. M. GUEDES a H. C. RODRIGUES. A hierarchical model for concurrent material and topology optimisation of three-dimensional structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2008, **35**(2), 107–115. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-007-0141-3
- [10] LIU, L., J. YAN a G. CHENG. Optimum structure with homogeneous optimum truss-like material. *Computers & Structures* [online]. 2008, **86**(13), 1417–1425. ISSN 0045-7949. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.04.030
- [11] YAN, X., X. HUANG, Y. ZHA a Y. M. XIE. Concurrent topology optimization of structures and their composite microstructures. *Computers and Structures* [online]. 2014, **133**, 103–110. ISSN 00457949. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruc.2013.12.001

- [12] NIU, B., J. YAN a G. D. CHENG. Optimum structure with homogeneous optimum cellular material for maximum fundamental frequency. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2009, **39**(2), 115–132. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-008-0334-4
- [13] DENG, J D, J YAN a G D CHENG. Multi-objective concurrent topology optimization of thermoelastic structures composed of homogeneous porous material. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2013, **47**(4), 583–597. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-012-0849-6
- [14] GUO, X., X. ZHAO, W. ZHANG, J. YAN a G. SUN. Multi-scale robust design and optimization considering load uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2015, **283**, 994–1009. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/j.cma.2014.10.014
- [15] XIA, L. a P. BREITKOPF. Concurrent topology optimization design of material and structure within FE2 nonlinear multiscale analysis framework. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2014, **278**, 524–542. ISSN 0045-7825. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.05.022
- [16] SIVAPURAM, R., P. D. DUNNING a H. A. KIM. Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2016, **54**(5), 1267–1281. ISSN 1615-147X. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-016-1519-x
- [17] WANG, Yiqiang, Feifei CHEN a Michael Yu WANG. Concurrent design with connectable graded microstructures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2017, **317**, 84–101. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/j.cma.2016.12.007
- [18] TANG, Y., A. KURTZ a Y. F. ZHAO. Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design* [online]. 2015, **69**, 91–101. ISSN 00104485. Dostupné z: doi:10.1016/j.cad.2015.06.001
- [19] GEBISA, A. W. a H. G. LEMU. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **276**(1). ISSN 1757899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/276/1/012026
- [20] MORGAN, H. D., H. U. LEVATTI, J. SIENZ, A. J. GIL a D. C. BOULD. GE Jet Engine Bracket Challenge: A Case Study in Sustainable Design. *Sustainable Design and Manufacturing*. 2014, 95–107.
- [21] CARTER, W T, D J ERNO, D H ABBOTT, C E BRUCK, G H WILSON, J B WOLFE, D M FINKHOUSEN, A TEPPER a R G STEVENS. The GE aircraft engine bracket challenge: an experiment in crowdsourcing for mechanical design concepts. In: *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2014, s. 1402–1411.
- [22] CHENG, Lin, Pu ZHANG, Emre BIYIKLI, Jiayi BAI, Joshua ROBBINS a Albert TO. Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2017, **23**(4), 660–677. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-04-2016-0069

- [23] CHEN, Wenjiong, Xiaonan ZHENG a Shutian LIU. Finite-Element-Mesh Based Method for Modeling and Optimization of Lattice Structures for Additive Manufacturing. *Materials* [online]. 2018, **11**(11), 2073. Dostupné z: doi:10.3390/ma11112073
- [24] LK ENGINEERING. *LKE - profesionální technické výpočty* [online]. [vid. 2018-06-23]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/>
- [25] ALTAIR ENGINEERING. *Altair: Transforming the Way Companies Design Products and Make Decisions* [online]. 2019 [vid. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.altair.com/>
- [26] NTOPOLOGY. *nTopology - Engineering software for advanced manufacturing* [online]. [vid. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://ntopology.com/>
- [27] ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2006, **364**(1838), 15–30. ISSN 1364503X. Dostupné z: doi:10.1098/rsta.2005.1678
- [28] GIBSON, Lorna J a Michael F ASHBY. *Cellular solids: structure and properties*. B.m.: Cambridge university press, 1999.
- [29] DESHPANDE, V S, N A FLECK a M F ASHBY. Effective properties of the octet-truss lattice material [online]. 2001, **49**, 1747–1769. ISSN 00225096. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-5096(01)00010-2
- [30] SMITH, M., Z. GUAN a W. J. CANTWELL. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2013, **67**, 28–41. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.12.004
- [31] AREMU, A.O., I. MASKERY, C. TUCK, I.A. ASHCROFT, R.D. WILDMAN a R.I.M HAGUE. A comparative Finite Element study of cubic unit cells for Selective Laser Melting. *International Solid Freeform Fabrication Symposium2*. 2014, 1238–1249.
- [32] LEARY, Martin, Maciej MAZUR, Joe ELAMBASSERIL, Matthew MCMILLAN, Thomas CHIRENT, Yingying SUN, Ma QIAN, Mark EASTON a Milan BRANDT. Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design* [online]. 2016, **98**, 344–357. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127
- [33] HANZL, Pavel, Ivana ZETKOVA a Milan DANA. A Comparison of Lattice Structures in Metal Additive Manufacturing [online]. 2017, 0481–0485. Dostupné z: doi:10.2507/28th.daaam.proceedings.067
- [34] EGAN, P. F., GONELLA, V. C., ENGENSERGER, M., FERGUSON, S. J. a SHEA, K. Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing. *PLoS ONE* [online]. 2017, **12**(8), 1–21. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0182902
- [35] PANESAR, Ajit, Meisam ABDI, Duncan HICKMAN a Ian ASHCROFT. Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **19**, 81–94. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.11.008

- [36] FENG, Qixiang, Qian TANG, Zongmin LIU, Ying LIU a Rossi SETCHI. An investigation of the mechanical properties of metallic lattice structures fabricated using selective laser melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2018, **232**(10), 1719–1730. Dostupné z: doi:10.1177/0954405416668924
- [37] TAKEZAWA, Akihiro, Kazuo YONEKURA, Yuichiro KOIZUMI, Xiaopeng ZHANG a Mitsuru KITAMURA. Isotropic Ti–6Al–4V lattice via topology optimization and electron-beam melting. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **22**(June), 634–642. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.06.008
- [38] XIAO, Z F, Y Q YANG, R XIAO, Y C BAI, C H SONG a D WANG. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Materials & Design* [online]. 2018, **143**, 27–37. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.01.023
- [39] MERTENS, Anne, Olivier DEDRY, David REUTER, Olivier RIGO a Jacqueline LECOMTE-BECKERS. Thermal treatments of AlSi10Mg processed by laser beam melting. In: *Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2015, s. 1007–1016.
- [40] ABOULKHAIR, Nesma T., Ian MASKERY, Chris TUCK, Ian ASHCROFT a Nicola M. EVERITT. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2016, **667**, 139–146. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2016.04.092
- [41] MASKERY, I., N. T. ABOULKHAIR, A. O. AREMU, C. J. TUCK, I. A. ASHCROFT, R. D. WILDMAN a R. J.M. HAGUE. A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A* [online]. 2016, **670**, 264–274. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2016.06.013
- [42] RAO, Jeremy H, Paul ROMETSCH, Xinhua WU a Chris H J DAVIES. The processing and heat treatment of selective laser melted Al-7Si-0.6Mg alloy. In: Francis FROES a Rodney BOYER, ed. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* [online]. B.m.: Elsevier, 2019, s. 143–161. ISBN 978-0-12-814062-8. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00008-X
- [43] SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2001, **21**(2), 120–127. ISSN 1615147X. Dostupné z: doi:10.1007/s001580050176
- [44] LIU, K. a A. TOVAR. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2014, **50**(6), 1175–1196. ISSN 16151488. Dostupné z: doi:10.1007/s00158-014-1107-x
- [45] VAVERKA, O., KOUTNÝ, D. a PALOUŠEK, D. Topologically optimized axle carrier for Formula Student produced by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2019, **25**(9), 1545–1551. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-07-2018-0171

- [46] VAVERKA, O, D KOUTNY, R VRANA, L PANTELEJEV a D PALOUSEK. Effect of heat treatment on additively manufactured parts. In: *ENGINEERING MECHANICS 2018 PROCEEDINGS, VOL 24* [online]. B.m.: ACAD SCI CZECH REPUBLIC, INST THEORETICAL & APPLIED MECHANICS, 2018, s. 897–900. Engineering Mechanics. ISBN 978-80-86246-91-8. Dostupné z: doi:10.21495/91-8-897
- [47] VAVERKA, O.; ZABLOUDIL, J.; KOUTNÝ, D.; PANTĚLEJEV, L.; PALOUŠEK, D.; DOČEKALOVÁ, K. Effect Of Heat Treatment On Mechanical Properties Of AlSi7Mg0,6 Aluminium Alloy Processed By SLM. In *Euro PM2019 Proceedings*. Maastricht: European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2019. s. 1-6. ISBN: 978-1-899072-51-4.
- [48] VRÁNA, R.; VAVERKA, O.; ČERVINEK, O.; PANTĚLEJEV, L.; HURNÍK, J.; KOUTNÝ, D.; PALOUŠEK, D. Heat Treatment of the SLM Processed Lattice Structure Made of AlSi10Mg and Its Effect on the Impact Energy Absorption. In *Euro PM2019 Proceedings*. Maastricht: 2019. s. 1-6. ISBN: 978-1-899072-51-4.
- [49] VRÁNA, R.; VAVERKA, O.; KOUTNÝ, D.; DOCEKALOVA, K; PALOUŠEK, D. Shape and dimensional analysis of lattice structures produced by selective laser melting. *MM Science Journal*. 2019, 13(6), 3938-3942. ISSN 18031269. Dostupné z: DOI: 10.17973/MMSJ.2020_06_2020013
- [50] VAVERKA, O. Ultra lehké komponenty vyráběné kovovým 3D tiskem. *MM Průmyslové spektrum*, 2019, 4, 60-62. ISSN 1212-2572

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$c(\mathbf{x})$	poddajnost zapsaná jako funkce prostorové proměnné
$F(\mathbf{u}(\rho), \rho)$	cílová funkce optimalizace závislá na hustotě a posuvu
\mathbf{F}	matice vnějšího zatížení
G_i	objemové okrajové podmínky
\mathbf{K}	matice tuhosti
M	počet subelementů v jednom konečném prvku
N	počet elementů konečnoprvkové sítě
$\mathbf{u}(\mathbf{x})$	množina posuvů jako funkce polohy
\mathbf{U}	matice posunutí
V_0	původní objem optimalizované oblasti
\mathbf{x}	množina poloh
$\rho(\mathbf{x})$	hustota jako funkce polohy
Ω	optimalizovaná oblast
BESO	Bi-directional Evolutionary Structural Optimisation
PAMP	Porous Anisotropic Material with Penalization
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
BCC	prostorově středěná krychle
BCCZ	prostorově středěná krychle s pruty ve směru osy Z
BFCCZ	prostorově a plošně středěná krychle s pruty ve směru osy Z
ECC	hranově středěná krychle
FCC	plošně středěná krychle
F ₂ BCC (FBCC)	prostorově a plošně středěná krychle
PFCC	plošně středěná krychle s pruty ve směru osy Z
VC	vrcholově spojená krychle

EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
T6	rozpouštěcí žihání s kalením ve vodě a umělým stárnutím
μCT	mikro počítačová tomografie
2D	plošné
3D	prostorové
CAD	Computer Aided Design
MKP	Metoda Konečných Prvků
IF	Impact Factor
WOS	Web of Science
LÚ	Letecký ústav
ÚMTB	Ústav mechaniky těles a biomechaniky
ÚMVI	Ústav materiálových věd a inženýrství

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1: Analytické řešení poloviny Michellova nosníku [2].	6
Obr. 2.2: Topologická optimalizace [3].	6
Obr. 2.3: Tvarová optimalizace [3].	6
Obr. 2.4: Velikostní optimalizace [3].	7
Obr. 3.1: Optimální řešení nosníku navržené hierarchickým přístupem formulovaným pomocí přetvoření (vlevo) a napětí (vpravo) [8].	10
Obr. 3.2: Tabulka ukazující výsledky při konstantním objemovém podílu a měnící se relativní hustotě struktury [10].	11
Obr. 3.3: Michellův nosník optimalizovaný metodou FE2 s využitím BESO (vlevo). Jednoúrovňový lineární design (vpravo). [15]	12
Obr. 3.4: Princip Level-set metody ukázaný na generaci knihovny struktur u Wanga et al. [17]	12
Obr. 3.5: Řešení L-nosníku s 12 mikrostrukturami a 40 % použitého materiálu [16].	13
Obr. 3.6: Optimalizovaný držák do proudového motoru [18].	14
Obr. 3.7: Uniformní struktura na držáku vlevo a optimalizovaná na držáku vpravo [22].	15
Obr. 3.8: Nahrazování elementů konečnoprvkové sítě mikro-prutovými strukturami [23].	15
Obr. 3.9: Součást nahrazená jednoduchou (vlevo) a vyztuženou (vpravo) mikro-prutovou strukturou [23].	16
Obr. 3.10: První generace konzoly satelitní antény navržené firmou LK Engineering [24].	16
Obr. 3.11: Držák na skleněné desky optimalizovaný společností Altair [25].	17
Obr. 3.12: Pedál do závodního vozu optimalizovaný společností nTopology [26].	17
Obr. 3.13: a) ohybově dominantní struktura, b) tahově dominantní struktura c) staticky přeúčtená struktura [27].	18
Obr. 3.14: Dominantní ohyb u plastického materiálu (vlevo), ztráta vzpěrné stability (uprostřed) a lom (vpravo) [27].	19
Obr. 3.15: Porovnání tuhosti jednotlivých buněk a celých struktur [31].	20
Obr. 3.16: Identifikace jednotlivých úhlů, které svírají pruty s podložkou. Modré jsou nevyrobitelné [32].	21

Obr. 3.17: Porovnání vybraných druhů strukturovaných materiálů namáhaných v ose z a x [33].	22
Obr. 3.18: Knihovna použitých typů struktur [34].	23
Obr. 3.19: Relativní porovnání jednotlivých druhů mikro-prutových buněk [34].	23
Obr. 3.20: Varianty definované pro mechanické testy a testy samonosnosti [35].	24
Obr. 3.21: Relativní porovnání jednotlivých přístupů k použití strukturovaného materiálu [35].	25
Obr. 3.22: a) základní tvar, b) optimalizovaný tvar bez děr, c-e) optimalizovaný tvar s děrami ve středech stěn, f-h) optimalizovaný tvar s děrami v rozích [37].	26
Obr. 3.23: Definice tří typů okrajových podmínek a postup topologické iterace [38].	27
Obr. 3.24: Souhrn vlivu zpracování T6 na materiál AlSi10Mg [40].	29
Obr. 4.1: Příklady implicitních buněk, které ale nejdou mezi sebou propojit [35].	32
Obr. 5.1: Blokové schéma postupu řešení disertační práce.	39
Obr. 5.2: Přetvoření na elementárním prvku.	40
Obr. 6.1: Základní knihovna buněk použitá pro výzkum.	44
Obr. 6.2: Modul pružnosti v tahu/tlaku v ose x a y v závislosti na relativní hustotě.	45
Obr. 6.3: Modul pružnosti v tahu/tlaku v ose z v závislosti na relativní hustotě.	45
Obr. 6.4: Modul pružnosti ve smyku v rovině xy v závislosti na relativní hustotě.	46
Obr. 6.5: Modul pružnosti ve smyku v rovině xz a yz v závislosti na relativní hustotě.	46
Obr. 6.6: Porovnávací tabulka pro modul pružnosti v tahu/tlaku v rovině xy. Barevně jsou označeny relativní hustoty odpovídající modulu pružnosti ze sloupce „SOLID“	47
Obr. 6.7: Výřez výběrové tabulky pro rozsah hustot 0,3 – 1 a možné kombinace elementárních namáhání. Každé výpočtové hustotě (první sloupec) náleží určitý typ struktury a její relativní hustota.	47
Obr. 6.8: Vybrané tahové diagramy pro tepelné zpracování AlSi10Mg.	49
Obr. 6.9: Vyhodnocení celkových deformací na naskenované geometrii trámových vzorků.	50
Obr. 6.10: Závislost deformace způsobené vnitřním napětím na teplotě a výdrži umělého stárnutí.	50
Obr. 6.11: Topologicky optimalizovaná levá přední těhlice pro závodní vůz.	51
Obr. 6.12: Jednoduchá optimalizovaná geometrie tvořená BCC strukturou o různé relativní hustotě.	52